



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Distribuição, zonagem agroecológica e aptidão do
milho em contexto de cenários climáticos:
observação remota e modelação espacial para a
Bacia Leiteira do Entre Douro e Minho (NW
Portugal)

André Joaquim Fonte da Silva

Escola Superior Agrária



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

André Joaquim Fonte da Silva

Distribuição, zonagem agroecológica e aptidão do
milho em contexto de cenários climáticos:
observação remota e modelação espacial para a
Bacia Leiteira do Entre Douro e Minho (NW Portugal)

Nome do curso de mestrado

Mestrado em Engenharia Agronómica

Trabalho efetuado sob a orientação de

António Martins Bonito

Joaquim Mamede Alonso

junho de 2026

*As doutrinas expressas neste
trabalho são de exclusiva
responsabilidade do autor.*

ÍNDICE

Índice	iv
Agradecimentos	vii
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Lista de abreviaturas.....	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Quadros.....	xi
Lista de Anexos.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. A importância da cultura do milho	1
1.2. Justificação e relevância do estudo.....	5
1.3. Objetivos.....	6
2. A cartografia, zonagem e A aptidão da cultura do milho.....	8
2.1. A cultura do milho na bacia leiteira.....	8
2.2. Conceitos e aplicações de zonagem agroecológica	11
2.2.1. Integração de cenários climáticos na zonagem agroecológica	14
2.3. Indicadores biofísicos	16
2.3.1. Indicadores bioclimáticos	16
2.3.2. Indicadores edáficos.....	17
2.3.3. Indicadores fisiográficos	18
2.3.4. Integração dos indicadores biofísicos	19
2.4. Índices de vegetação e curvas fenológicas	20
2.5. Análise de séries temporais na agricultura	26

3. Material e métodos.....	30
3.1. Área de estudo.....	30
3.2. Estrutura e fluxo metodológico do estudo.....	33
3.3. Identificação e mapeamento espacial das áreas de milho por detecção remota	34
3.4. Avaliação e modelação da aptidão agroecológica do milho	35
3.4.1. Variáveis climáticas	36
3.4.2. Variáveis fisiográficas	37
3.4.3. Variáveis pedológicas	37
3.4.4. Reclassificação e integração multicritério para cartografia de aptidão de ciclos FAO	38
3.5. Otimização espacial através do Modelo <i>Multi-Objective Land Allocation</i> (MOLA)	41
4. Resultados e discussão	43
4.1. Distribuição espacial e evolução temporal da área de milho (2017–2025).....	43
4.1.1. Distribuição espacial da cultura do milho (2017-2025).....	43
4.1.2. Evolução temporal da área de milho (detecção remota e Pedido único (PU))	47
4.1.3. Comparação entre área estimada por detecção remota e área declarada no Pedido Único	49
4.2. Modelação da aptidão agroecológica em cenário atual e futuro.....	51
4.2.1. Cenário de referência (1981-2010).....	51
4.2.2. Cenário SSP2-4.5	52
4.2.2.1. Período 2041–2070	52
4.2.2.2. Período 2071–2100.....	53
4.2.3. Cenário SSP5-8.5	54
4.2.3.1. Período 2041–2070	54
4.2.3.2. Período 2071–2100.....	55
4.3. Otimização espacial da distribuição dos ciclos FAO	55
4.4. Discussão de resultados	58
4.4.1. Dinâmica espacial e tendências de ocupação da cultura do milho	58

4.4.2. Distribuição e evolução da aptidão agroecológica para o milho em cenários climáticos	61
4.4.3. Reconfiguração territorial e implicações estratégicas da otimização espacial	63
Considerações Finais	65
Referências bibliográficas	70
Anexos.....	74

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, deixo um agradecimento muito especial aos meus pais, por todo o esforço, apoio e confiança que depositaram em mim ao longo desta caminhada. Foram fundamentais para que pudesse alcançar esta etapa.

À minha irmã, agradeço todo o carinho, preocupação e apoio constante ao longo deste percurso. A forma como sempre estiveste presente teve um significado muito especial nesta etapa da minha vida.

Ao Professor António Bonito, expresso o meu profundo agradecimento pela orientação, disponibilidade e apoio constante ao longo deste percurso. Mais do que um orientador, é uma referência pela forma como sempre sabe aconselhar, motivar e encontrar soluções nos momentos mais desafiantes. O seu exemplo e confiança têm um impacto significativo na minha caminhada.

Ao Professor Joaquim Alonso, expresso o meu sincero agradecimento. O seu acompanhamento, conhecimento e espírito crítico foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os colaboradores do Centro de Geomática e Análise de Sistemas Ambientais (CIGESA) que acompanharam o desenvolvimento deste projeto, especialmente ao Renato e ao Miguel, pela disponibilidade, apoio prestado ao longo destes meses e pela oportunidade de aprender convosco. Agradeço, igualmente, a todos os docentes da Escola Superior Agrária por todo o apoio e conhecimentos transmitidos ao longo destes anos.

E, por fim, a ti, Beatriz. Por seres casa em todos os momentos. Obrigado por seres, todos os dias, a minha maior força. Pela forma como me compreendes sem precisar de palavras, pela serenidade que trazes à minha vida e por nunca me deixares esquecer aquilo de que sou capaz. Ter-te comigo tornou este percurso mais leve, mais feliz e muito mais significativo. Esta conquista também é tua.

A todos, o meu muito obrigado.

RESUMO

A cultura do milho assume um papel estruturante na bacia leiteira do Entre Douro e Minho, constituindo a principal base forrageira dos sistemas intensivos de produção animal predominantes nesta região. A sua relevância económica e agronómica, aliada à crescente necessidade de adaptação dos sistemas agrícolas aos efeitos das alterações climáticas, reforça a importância de compreender a sua distribuição territorial, os fatores que condicionam a sua aptidão produtiva e a sua potencial evolução em cenários climáticos futuros.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma abordagem integrada para analisar a distribuição espacial da cultura do milho na bacia leiteira do Entre Douro e Minho, identificar os principais fatores agroecológicos associados à sua implantação territorial e avaliar a evolução potencial da aptidão da cultura perante diferentes cenários de alteração climática.

Para esse efeito desenvolveu-se uma metodologia assente na integração de técnicas de deteção remota, sistemas de informação geográfica e modelação espacial. A identificação e o mapeamento das áreas ocupadas pela cultura do milho foram realizados para o período compreendido entre 2017 e 2025, com recurso a imagens Sentinel-2 e a métodos de classificação supervisionada. Paralelamente, procedeu-se à modelação da aptidão agroecológica para diferentes grupos de maturação do milho, entre FAO 200 e FAO 700, integrando variáveis climáticas, fisiográficas e pedológicas. Foi ainda aplicada uma abordagem de otimização espacial da distribuição potencial dos diferentes grupos FAO, através do modelo Multi-Objective Land Allocation (MOLA), considerando cenários climáticos atuais e futuros.

Os resultados obtidos evidenciam uma forte persistência espacial da cultura do milho na região, bem como uma estreita associação entre a sua distribuição territorial e os principais territórios de produção leiteira. A comparação entre as áreas estimadas por deteção remota e os registos administrativos revelou diferenças relevantes, sugerindo limitações associadas à representatividade da informação declarativa enquanto expressão da ocupação efetiva do solo agrícola.

No domínio da aptidão agroecológica, os cenários climáticos futuros analisados apontam para uma reorganização progressiva da adequação territorial da cultura, marcada pela expansão potencial de áreas favoráveis a grupos FAO de maior duração. Esta tendência reflete o aumento da disponibilidade térmica acumulada e poderá traduzir-se numa alteração da configuração produtiva regional. A otimização espacial confirmou igualmente uma tendência de expansão territorial dos ciclos mais longos em cenários futuros, reforçando a possibilidade de uma reconfiguração gradual dos sistemas de produção de milho na bacia leiteira do Entre Douro e Minho.

Em termos globais, o presente trabalho contribui para uma compreensão mais integrada da relação entre agricultura, território e alterações climáticas, tendo como referência a bacia leiteira do Entre Douro e Minho. Simultaneamente, constitui um contributo metodológico e aplicado para o apoio ao planeamento agrícola, à gestão territorial e à adaptação futura dos sistemas produtivos regionais.

Palavras-chave: *Zea mays L.; Sentinel-2; Random Forest; aptidão agroecológica; graus-dia de crescimento (GDD); grupos de maturação FAO; Multi-Objective Land Allocation (MOLA); adaptação climática.*

ABSTRACT

Maize plays a structural role in the dairy basin of Entre Douro e Minho, representing the main forage basis of the intensive livestock production systems that predominate in the region. Its economic and agronomic relevance, combined with the growing need to adapt agricultural systems to the effects of climate change, reinforces the importance of understanding its territorial distribution, the factors conditioning its productive suitability, and its potential evolution under future climate scenarios.

In this context, this study aimed to develop an integrated approach to analyse the spatial distribution of maize cultivation in the Entre Douro e Minho dairy basin, identify the main agroecological factors associated with its territorial establishment, and assess the potential evolution of crop suitability under different climate change scenarios.

To this end, a methodology was developed based on the integration of remote sensing techniques, geographic information systems and spatial modelling. The identification and mapping of maize-growing areas were carried out for the period between 2017 and 2025, using Sentinel-2 imagery and supervised classification methods. In parallel, agroecological suitability was modelled for different maize maturity groups, ranging from FAO 200 to FAO 700, by integrating climatic, physiographic and soil-related variables. A spatial optimisation approach was also applied to the potential distribution of the different FAO groups, using the Multi-Objective Land Allocation (MOLA) model, considering both current and future climate scenarios.

The results show a strong spatial persistence of maize cultivation in the region, as well as a close association between its territorial distribution and the main dairy production areas. The comparison between areas estimated through remote sensing and administrative records revealed relevant differences, suggesting limitations in the representativeness of declarative information as an expression of the effective occupation of agricultural land.

Regarding agroecological suitability, the future climate scenarios analysed point to a progressive reorganisation of the territorial suitability of maize cultivation, marked by the potential expansion of areas favourable to longer-duration FAO maturity groups. This trend reflects the increase in accumulated thermal availability and may translate into changes in the regional productive configuration. Spatial optimisation also confirmed a tendency towards the territorial expansion of longer crop cycles under future scenarios, reinforcing the possibility of a gradual reconfiguration of maize production systems in the Entre Douro e Minho dairy basin.

Overall, this study contributes to a more integrated understanding of the relationship between agriculture, territory and climate change, using the Entre Douro e Minho dairy basin as a reference area. At the same time, it provides both a methodological and applied contribution to support agricultural planning, territorial management and the future adaptation of regional production systems.

Keywords: *Zea mays L.; Sentinel-2; Random Forest; agroecological suitability; growing degree days (GDD); FAO maturity groups; Multi-Objective Land Allocation (MOLA); climate adaptation.*

LISTA DE ABREVIATURAS

AEC — Agro-Ecological Cell.

AEZ — Agro-Ecological Zone.

AHP — Analytic Hierarchy Process.

AWC — Available Water Capacity.

CAP — Confederação dos Agricultores de Portugal.

CHELSA — Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas.

CMIP6 — Coupled Model Intercomparison Project Phase 6.

CSV — Comma-Separated Values.

CTC — Capacidade de Troca Catiónica.

DGADR — Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural.

DGAV — Direção-Geral de Alimentação e Veterinária.

EDM — Entre Douro e Minho.

ESA — European Space Agency.

ESDAC — European Soil Data Centre.

EVI — Enhanced Vegetation Index.

FAO — Food and Agriculture Organization of the United Nations.

GAEZ — Global Agro-Ecological Zones.

GDD — Growing Degree Days (Graus-dia de crescimento).

GEE — Google Earth Engine.

GeoTIFF — Georeferenced Tagged Image File Format.

GNDVI — Green Normalized Difference Vegetation Index.

IEA — Inquérito à Estrutura das Explorações Agrícolas.

INE — Instituto Nacional de Estatística.

INIAV — Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária.

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPMA — Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

iSIP — Sistema de Identificação Parcelar.

MOLA — Multi-Objective Land Allocation.

MSI — Moisture Stress Index.

NDRE1 — Normalized Difference Red Edge Index 1.

NDRE2 — Normalized Difference Red Edge Index 2.

NDVI — Normalized Difference Vegetation Index.

NDWI — Normalized Difference Water Index.

OBIA — Object-Based Image Analysis.

PROT-Norte — Plano Regional de Ordenamento do Território do Norte.

PSRI — Plant Senescence Reflectance Index.

PU — Pedido Único.

RAN — Reserva Agrícola Nacional.

RDVI — Renormalized Difference Vegetation Index.

RF — Random Forest.

SAVI — Soil Adjusted Vegetation Index.

SCL — Scene Classification Layer.

SIG — Sistemas de Informação Geográfica.

SIPI — Structure Insensitive Pigment Index.

SRTM — Shuttle Radar Topography Mission.

SSP — Shared Socioeconomic Pathways.

SWIR — Shortwave Infrared.

TWI — Topographic Wetness Index.

VDVI — Visible Difference Vegetation Index.

WorldClim — WorldClim climate data database.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Produção, importação, exportação e consumo aparente de milho em Portugal (INE, 2025)	3
Figura 3.1. Enquadramento da área de estudo e respetiva carta de uso e ocupação do solo (COS 2018).	32
Figura 3.2. Fluxograma da metodologia adotada para o mapeamento das áreas de milho, modelação da aptidão agroecológica e otimização espacial dos grupos de maturação FAO na bacia leiteira primária do Entre Douro e Minho.	33
Figura 4.1. Distribuição espacial da cultura do milho na área de estudo, estimada por deteção remota, nos anos de 2017 (esquerda) e 2025 (direita).	44
Figura 4.2. Frequência da ocupação do milho (2017–2025)	46
Figura 4.3. Evolução anual da área total de milho estimada por deteção remota e declarada no Pedido Único (2017–2025).	47
Figura 4.4. Diferença anual entre a área estimada por deteção remota e a área declarada no Pedido Único (2017–2025).	48
Figura 4.5. Diferença acumulada (2017–2025) entre a área estimada por deteção remota e a área declarada no Pedido Único, por concelho.	49
Figura 4.6. Relação entre a área total anual estimada por deteção remota e a área declarada no Pedido Único (2017–2025).	50
Figura 4.7. Distribuição espacial otimizada dos grupos FAO do milho para silagem no cenário de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos 2041–2070 e 2071–2100, resultante da aplicação do modelo de alocação espacial (MOLA).	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Índices de vegetação utilizados no estudo, respetivas fórmulas matemáticas, bandas espectrais e principal interpretação agronómica	23
Quadro 3.1. Critérios de reclassificação dos fatores climáticos considerados no estudo	39
Quadro 3.2. Critérios de reclassificação dos fatores do solo considerados no estudo	40
Quadro 3.3. Critérios de reclassificação dos fatores topográficos considerados no estudo	40

LISTA DE ANEXOS

Anexo I - Distribuição espacial anual da cultura do milho na área de estudo, estimada por detecção remota, no período 2017–2025.	74
Anexo II - Área anual ocupada pela cultura do milho na área de estudo, estimada por detecção remota, por concelho, no período 2017–2025 (hectares).	75
Anexo III - Área anual de milho declarada no Pedido Único (PU), por concelho, na área de estudo, no período 2017–2025 (hectares)	75
Anexo IV - Diferença anual entre a área de milho estimada por detecção remota e a área declarada no Pedido Único (PU), por concelho, no período 2017–2025 (hectares).	76
Anexo V - Graus-dia acumulados ($GDD > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) para diferentes grupos FAO (200–700), no cenário climatológico de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para os períodos 2041–2070 e 2071–2100.	77
Anexo VI Distribuição espacial dos grupos de maturação FAO do milho, estimados a partir dos graus-dia acumulados ($GDD > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), no cenário climatológico de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos 2041–2070 e 2071–2100.	78
Anexo VII - Número de dias sem geada para diferentes grupos FAO (200–700), no cenário climatológico de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para os períodos 2041–2070 e 2071–2100.	79
Anexo VIII - Precipitação acumulada no período fenológico do milho (março a setembro) para diferentes grupos FAO (200–700), no período de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para os períodos 2041–2070 e 2071–2100.	80
Anexo IX - Indicadores edáficos para o cultivo de milho, expressos pela capacidade de troca catiónica (CTC) e pela capacidade de água disponível (AWC), para diferentes grupos FAO (200–700).	81
Anexo X - Índices topográficos e climáticos locais (TWI, exposição ao vento, radiação solar e declive) para diferentes grupos FAO (200–700).	82
Anexo XI - Aptidão agroecológica do milho no Cenário de referência (1981-2010)	83
Anexo XII - Aptidão agroecológica do milho no cenário SSP2-4.5	89
Anexo XIII - Aptidão agroecológica do milho no cenário SSP5-8.5	101

1. INTRODUÇÃO

1.1. A importância da cultura do milho

O milho (*Zea mays L.*), pertencente à família Poaceae, assume-se como uma das culturas cerealíferas de maior relevância à escala mundial, quer pela expressão do seu volume de produção, quer pela multiplicidade de funções que desempenha nos sistemas agroalimentares contemporâneos (Anpromis, 2025; Azevedo & Manuel, 2023.; Azevedo, 2023). A sua importância ultrapassa a dimensão estritamente produtiva, estendendo-se ao abastecimento das cadeias de alimentação animal, à indústria transformadora e à estabilidade de diversos sistemas agrícolas, o que lhe confere um valor económico, estratégico e territorial crítico.

No plano internacional, a produção de milho continua a ser dominada pelos Estados Unidos da América, pela China e pelo Brasil, países que, em conjunto, concentram a maior parte da produção estimada para a campanha de 2024/2025, num volume superior a 1200 milhões de toneladas (Anpromis, 2025). No espaço europeu, também esta cultura assume particular expressão, destacando-se países como França, Roménia e Hungria, não apenas pela amplitude das áreas cultivadas, mas também pelo seu contributo para o equilíbrio cerealífero da União Europeia (Anpromis, 2025). Neste enquadramento, o milho mantém-se como uma cultura estruturante, cuja relevância decorre simultaneamente da sua aptidão agronómica, da sua elevada adaptabilidade e do papel que desempenha na segurança do aprovisionamento alimentar e forrageiro.

Em Portugal, a cultura do milho revelou, ao longo dos últimos anos, um comportamento relativamente estável em termos de superfície cultivada, ainda que marcado por ligeiras oscilações anuais. Segundo a (Anpromis, 2025) foram declarados no Pedido Único 100 809 hectares em 2024 e 99 006 hectares em 2025, verificando-se, assim, uma ligeira redução da área instalada. No mesmo ano de 2025, contabilizaram-se 47 392 produtores de milho, evidenciando-se a ampla disseminação territorial da cultura e a sua persistente relevância no contexto agrícola nacional. Acresce que, em 2023, o milho representava cerca de 40 % da área total de cereais cultivados em Portugal, facto que confirma o seu peso estrutural no sistema produtivo cerealífero português.

Todavia, a relativa estabilidade da área cultivada não tem impedido a ocorrência de transformações na geografia e estrutura da produção. Com efeito, a distribuição espacial da cultura reflete alterações

significativas, resultantes da interação entre fatores ambientais, produtivos e económicos, nomeadamente a crescente variabilidade climática, a intensificação da pressão sobre os recursos hídricos e a exigência crescente de modelos de produção mais eficientes e sustentáveis (Soares et al., 2025). Esta evolução torna particularmente pertinente a análise da aptidão territorial da cultura, bem como a identificação das condições biofísicas que mais influenciam o seu desempenho e eficiência produtiva.

As principais regiões produtoras de milho em Portugal localizam-se no Alentejo, no Centro e no Norte do país, onde se concentram não só as maiores áreas cultivadas, mas também um número expressivo de agricultores dedicados à produção de milho-grão e de milho para silagem. No caso particular da região Norte, merecem especial destaque os concelhos de Barcelos e Vila do Conde, identificados como os dois maiores concelhos produtores de milho a nível nacional. Em conjunto, representam 10 492 hectares, correspondendo a cerca de 30 % da área total de produção de milho na região Norte (Anpromis, 2025). Estes dados evidenciam a forte especialização de determinados territórios e reforçam a necessidade de compreender os fatores que sustentam essa concentração produtiva.

A análise da evolução recente do setor permite constatar, contudo, que a produção nacional de milho permanece insuficiente para satisfazer as necessidades internas. Tal como ilustrado na Figura 1.1, a produção nacional tem-se mantido, na generalidade dos anos, entre 600 e 800 mil toneladas, ao passo que o consumo aparente oscila entre 2 e 3 milhões de toneladas. Esta diferença tem sido sistematicamente compensada através de importações anuais compreendidas entre 1,8 e 2,7 milhões de toneladas, o que traduz uma dependência estrutural do exterior no abastecimento desta matéria-prima. Esta realidade assume particular relevância num contexto de crescente incerteza geopolítica, volatilidade dos mercados e pressão sobre os sistemas produtivos, reforçando a necessidade de promover estratégias orientadas para o aumento da capacidade produtiva nacional, sem comprometer os princípios da sustentabilidade ambiental e da eficiência no uso dos recursos.



Figura 1.1. Produção, importação, exportação e consumo aparente de milho em Portugal em Toneladas (INE, 2025)

É neste quadro que a região do Entre Douro e Minho adquire especial significado analítico. A respetiva bacia leiteira constitui uma das mais importantes áreas de produção de leite em Portugal, distinguindo-se pela concentração de explorações pecuárias e pela intensificação dos sistemas produtivos (Brito et al., 2011). Nestes sistemas, o milho desempenha uma função central, sobretudo enquanto base alimentar dos ruminantes, assumindo-se como uma cultura determinante para a estabilidade técnica e económica das explorações agropecuárias da região. A sua importância não se esgota, por isso, no valor agronómico intrínseco, estendendo-se ao funcionamento global dos sistemas leiteiros e à sustentabilidade das cadeias de produção animal (Barreiros et al., 2018; Filipe et al., 2023; Filipe et al., 2025)

De acordo com a (Agrogarante, 2023), a região do Entre Douro e Minho concentrava cerca de 20 % da área nacional de milho, o que evidencia o seu papel estratégico no abastecimento forrageiro da principal bacia leiteira do país. Esta concentração territorial confere particular pertinência ao estudo da cultura nesta região, nomeadamente no que respeita à identificação dos fatores agroecológicos que condicionam a sua instalação, o seu desenvolvimento e o seu potencial produtivo. Compreender essa relação entre cultura e território constitui um passo essencial para sustentar decisões técnicas mais informadas e para promover modelos de uso do solo mais coerentes com as especificidades locais.

Paralelamente, o desenvolvimento das tecnologias de observação remota, dos sistemas de informação geográfica e das abordagens de modelação espacial tem vindo a criar novas oportunidades para a análise da cultura do milho em contexto territorial. Em particular, os índices de vegetação permitem monitorizar com maior regularidade e detalhe a dinâmica do coberto vegetal, possibilitando o acompanhamento da evolução fenológica da cultura e a identificação dos diferentes estádios do seu ciclo de desenvolvimento. A utilização destas ferramentas contribui para a produção de informação espacialmente explícita, objetiva e temporalmente consistente, potenciando abordagens de diagnóstico e apoio à decisão mais robustas do ponto de vista agronómico e territorial (Nordin et al., 2022).

Simultaneamente, a intensificação dos efeitos associados às alterações climáticas, a crescente escassez e irregularidade da disponibilidade hídrica e a necessidade de preservar a funcionalidade dos solos tornam evidente que o planeamento agrícola não pode continuar a assentar em lógicas indiferenciadas ou excessivamente generalistas. Pelo contrário, exige-se uma abordagem progressivamente mais ajustada às condições concretas de cada território, integrando variáveis biofísicas, produtivas e ambientais de forma articulada (Soares et al., 2023). Neste contexto, a aptidão agrícola deixa de poder ser entendida como uma condição abstrata ou estática, devendo antes ser interpretada à luz da interação entre solo, relevo, clima, disponibilidade de água e comportamento fenológico das culturas.

É precisamente neste enquadramento que a construção de uma zonagem agroecológica e aptidão para a cultura do milho se revela particularmente pertinente. Ao integrar informação relativa ao relevo, ao solo, ao clima e à fenologia da cultura, esta abordagem permite identificar áreas com diferentes níveis de aptidão, constituindo um instrumento de apoio à decisão técnica e ao ordenamento produtivo. Para além de possibilitar uma leitura mais fina das potencialidades e limitações do território, a zonagem agroecológica poderá contribuir para orientar práticas agrícolas mais eficientes, mais sustentáveis e mais ajustadas às especificidades da bacia leiteira do Entre Douro e Minho. Deste modo, o seu desenvolvimento assume relevância não apenas científica, mas também prática, na medida em que pode apoiar produtores, técnicos e decisores na construção de estratégias de produção territorialmente mais adequadas e resilientes.

1.2. Justificação e relevância do estudo

A pertinência do presente estudo decorre da convergência de vários fatores de natureza agronómica, territorial, económica e ambiental, que reforçam a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre a cultura do milho na bacia leiteira do Entre Douro e Minho.

Em primeiro lugar, importa sublinhar a elevada dependência da fileira leiteira regional relativamente ao milho, enquanto componente central da alimentação animal, em particular nos sistemas de produção intensiva baseados em silagem. Esta realidade confere à cultura uma importância estratégica no equilíbrio técnico e económico das explorações pecuárias, tornando prioritária a promoção de uma produção local capaz de responder, com maior eficiência e qualidade, às necessidades alimentares do efetivo bovino, em articulação com as condições edafoclimáticas e produtivas do território (Azevedo, 2023).

Em segundo lugar, justifica-se a produção de conhecimento territorialmente diferenciado para a bacia leiteira do Entre Douro e Minho, atendendo à expressiva heterogeneidade agroecológica que caracteriza esta região. A variabilidade observada ao nível dos solos, do relevo, do regime climático e das condições de uso do solo condiciona de forma significativa a aptidão agrícola e o comportamento produtivo das culturas, exigindo abordagens analíticas capazes de captar essas diferenças espaciais. No caso específico do milho, esta heterogeneidade poderá refletir-se tanto na sua adaptação agronómica como na expressão fenológica ao longo do ciclo cultural, o que reforça a necessidade de uma leitura integrada e espacialmente explícita do território.

Em terceiro lugar, o estudo adquire particular atualidade no contexto dos desafios colocados pela sustentabilidade agrícola e pelas alterações climáticas. A necessidade de compatibilizar produtividade, eficiência no uso dos recursos e resiliência dos sistemas produtivos exige instrumentos de análise e planeamento mais ajustados às dinâmicas ambientais emergentes. Neste domínio, vários trabalhos têm vindo a indicar que as alterações climáticas em Portugal poderão traduzir-se num aumento da acumulação térmica e, consequentemente, numa modificação das condições de aptidão para a cultura do milho. Em particular, o estudo de (Soares et al., 2025) sugere que, sob cenários climáticos futuros, a região Norte poderá apresentar condições de maior acumulação térmica, potenciando a produção de milho-grão em áreas tradicionalmente mais vocacionadas para o milho-silagem. Esta perspetiva torna especialmente relevante a avaliação das condições agroecológicas atuais e potenciais da região, bem

como a compreensão dos seus efeitos sobre o comportamento da cultura.

Por último, a relevância do estudo decorre igualmente da sua dimensão aplicada. O desenvolvimento de uma metodologia integrada de zonagem agroecológica, associada à caracterização fenológica da cultura, poderá originar informação técnica útil para produtores, técnicos agrícolas e agentes de planeamento territorial. Em particular, a disponibilização de mapas de aptidão agroecológica e de indicadores associados à dinâmica fenológica do milho poderá constituir um importante instrumento de apoio à decisão, com impacto direto na eficiência do planeamento forrageiro, na gestão agronómica das parcelas e na sustentabilidade dos sistemas de alimentação animal.

Deste modo, o presente estudo procura responder a uma necessidade científica e operacional: por um lado, aprofundar o conhecimento sobre a relação entre a cultura do milho e os fatores agroecológicos que condicionam a sua distribuição e desempenho na bacia leiteira do Entre Douro e Minho; por outro, produzir informação aplicável ao apoio à decisão, contribuindo para uma gestão territorialmente mais ajustada, tecnicamente mais robusta e ambientalmente mais sustentável da produção de milho nesta região.

1.3. Objetivos

O presente estudo tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia integrada de zonagem agroecológica para a cultura do milho na bacia leiteira do Entre Douro e Minho, assente na análise espacial dos principais fatores ambientais condicionantes e na caracterização fenológica da cultura, com vista ao apoio à decisão agronómica e ao reforço da sustentabilidade dos sistemas de produção animal da região.

Este objetivo geral enquadra-se na necessidade de compreender, de forma articulada, a influência das condições biofísicas do território sobre a distribuição, a aptidão e o comportamento fenológico do milho, produzindo conhecimento suscetível de apoiar estratégias de planeamento agrícola mais eficientes, mais resilientes e mais ajustadas às especificidades da bacia leiteira regional.

Para a concretização do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Mapear e caracterizar a distribuição espacial das áreas de produção de milho nos principais concelhos da bacia leiteira do Entre Douro e Minho, desde 2017, com base em dados espaciais e estatísticos;
- ii. Identificar e analisar os principais fatores agroecológicos suscetíveis de condicionar a aptidão da cultura do milho na região, designadamente os relacionados com o clima, os solos e o relevo;
- iii. Desenvolver uma zonagem agroecológica para a cultura do milho, integrando variáveis biofísicas e critérios de aptidão agrícola para o milho e respetivos ciclos FAO com recurso a sistemas de informação geográfica (SIG);
- iv. E propor recomendações técnicas e orientações de planeamento agrícola na fase de resultados ajustadas às diferentes zonas identificadas, com enfoque na eficiência produtiva, na sustentabilidade agronómica e na otimização da produção de milho para alimentação animal.

Em conjunto, estes objetivos visam estruturar uma abordagem metodológica capaz de articular análise territorial e diagnóstico agroecológico para uma futura monitorização fenológica à escala da parcela, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada da aptidão do território para a cultura do milho e para a formulação de estratégias de gestão mais ajustadas aos desafios dos sistemas produtivos locais.

2. A CARTOGRAFIA, ZONAGEM E A APTIDÃO DA CULTURA DO MILHO

2.1. A cultura do milho na bacia leiteira

A bacia leiteira do Entre Douro e Minho (EDM) constitui um dos mais relevantes territórios de produção leiteira em Portugal, quer pela elevada concentração de explorações pecuárias, quer pela intensidade produtiva que caracteriza os seus sistemas agropecuários. Neste contexto, o milho (*Zea mays L.*) assume-se como a cultura forrageira de maior importância estratégica, desempenhando um papel central na estrutura alimentar dos efetivos bovinos leiteiros e, por consequência, na estabilidade técnica e económica das explorações. A sua relevância decorre de um conjunto de atributos agronómicos e nutricionais amplamente reconhecidos, designadamente a elevada produtividade por unidade de área, a razoável adaptabilidade a diferentes contextos edafoclimáticos e o significativo valor energético da biomassa produzida, fatores que explicam a sua consolidação como base forrageira dos sistemas intensivos predominantes na região (Curado et al., 2007).

A importância do milho na EDM não se esgota, contudo, na sua função enquanto cultura de elevado rendimento. Nos sistemas leiteiros intensivos, esta espécie integra uma lógica de autoaprovisionamento forrageiro que visa reduzir a dependência de alimentos adquiridos ao exterior, estabilizar custos de alimentação e melhorar a eficiência global da produção animal. Nesta perspetiva, o milho constitui um elemento estruturante da sustentabilidade técnico-económica das explorações, na medida em que influencia diretamente a formulação alimentar, o custo por litro de leite produzido e a capacidade de resposta das explorações à volatilidade dos mercados dos alimentos compostos e das matérias-primas energéticas (Barreiros et al., 2018).

Segundo a Anpromis (2025), a área nacional de milho forrageiro declarada no Pedido Único ascendia a 44 726 hectares, concentrando-se de forma significativa no litoral Norte, onde se insere a EDM. Este dado confirma não apenas a expressão territorial da cultura, mas também a sua forte associação às regiões de maior especialização pecuária. Com efeito, em contextos de produção leiteira intensiva, o milho representa uma resposta agronomicamente eficiente à necessidade de assegurar grandes volumes de alimento energético por hectare, sendo particularmente valorizado pelo seu contributo para o equilíbrio nutricional das dietas dos ruminantes, em especial quando articulado com outras forragens conservadas ou frescas (Gaspar, 2007). Em termos mais amplos, a fileira do milho mantém-se estratégica para a alimentação animal em Portugal, contribuindo para a estabilidade da produção de

leite e de derivados, sobretudo em regiões onde a conjugação entre clima temperado húmido, aptidão agrícola dos solos e disponibilidade de água favorece a instalação e o desenvolvimento da cultura (CAP, 2023; DGAV, 2024).

Neste enquadramento, a silagem de milho destaca-se como a principal forma de conservação e utilização da cultura na EDM. A ensilagem permite preservar, com relativa eficácia, o valor nutritivo da forragem produzida, assegurando o fornecimento regular de alimento ao longo do ano e atenuando a sazonalidade inerente à produção forrageira. Nos sistemas leiteiros intensivos, a silagem de milho constitui, frequentemente, a principal fonte de energia e de fibra digestível das dietas de vacas de elevada produção, podendo representar, em muitos casos, mais de 40 % da matéria seca ingerida (Agros, 2024). Esta centralidade decorre, em grande medida, do elevado teor de amido, geralmente compreendido entre 28 % e 35 %, e do seu valor energético, superior a 6,5 MJ/kg de matéria seca, características que contribuem para reduzir a dependência de concentrados e para promover maior estabilidade do custo alimentar por unidade de produto obtido (Eurostat, 2024; Gaspar, 2007).

A importância da silagem de milho na EDM encontra correspondência noutras regiões europeias de matriz atlântica, designadamente na Bretanha, em França, e na Galiza, em Espanha, onde sistemas leiteiros intensivos se desenvolveram com base em estratégias alimentares fortemente assentes em milho ensilado e prados temporários (Braga, 2008). Nesses contextos, tal como no Noroeste português, a combinação entre elevada densidade pecuária, condições edafoclimáticas favoráveis e disponibilidade hídrica permitiu consolidar o milho forrageiro como componente estrutural das dietas bovinas (Europeia, 2023). No caso da EDM, o clima húmido, a ocorrência de precipitação significativa ao longo do ano e a disponibilidade de áreas agrícolas com aptidão para culturas anuais forrageiras criam condições favoráveis à integração do milho em sistemas de produção intensiva orientados para a produção de leite (Curado et al., 2007).

Do ponto de vista técnico, o estabelecimento da cultura do milho na região ocorre maioritariamente em regime de produção convencional, com sementeiras concentradas, em regra, entre o final de abril e meados de maio. Não obstante, a calendarização cultural pode variar em função do grupo de precocidade das variedades utilizadas, frequentemente enquadradas em classes FAO entre 200 e 700, bem como das condições térmicas e hídricas do solo à data da instalação. Em Portugal, predominam híbridos de ciclo médio a semi-tardio, nomeadamente entre FAO 500 e FAO 600, cujo ciclo vegetativo ronda os 130 dias e cuja ocupação do solo pode aproximar-se dos 150 dias, considerando as fases de

instalação, desenvolvimento e colheita (Coixão, 2018). Esta plasticidade varietal constitui um dos elementos que explicam a ampla difusão da cultura, permitindo adaptar o ciclo produtivo a diferentes contextos regionais e objetivos de produção.

Na EDM, é ainda frequente a integração do milho em sistemas de rotação intensiva com culturas instaladas no outono-inverno, designadamente misturas de cereais praganosos e azevém, possibilitando a obtenção de duas colheitas anuais de forragem e maximizando o aproveitamento produtivo da terra ao longo do ano agrícola (Azevedo, 2023). Embora esta intensificação possa aumentar a eficiência do uso do solo e reforçar a disponibilidade alimentar das explorações, ela também tende a agravar alguns riscos agronómicos e ambientais, nomeadamente a compactação do solo, a degradação estrutural e a lixiviação de nutrientes. Torna-se, por isso, indispensável enquadrar estes sistemas em práticas de conservação do solo e em planos de fertilização ajustados às condições edafoclimáticas locais e à capacidade de extração das culturas instaladas (DGAV, 2024).

Ao longo das últimas décadas, a evolução da cultura do milho tem sido condicionada por fatores de natureza técnica, económica e ambiental. Por um lado, a introdução de híbridos geneticamente mais produtivos, a modernização dos sistemas de fertilização, a melhoria das práticas de rega e a mecanização crescente das operações culturais contribuíram para o aumento dos rendimentos por hectare em diferentes contextos produtivos. Por outro lado, estes ganhos de eficiência foram acompanhados por um acréscimo da exposição das explorações a pressões económicas relevantes, resultantes do aumento dos custos dos fatores de produção, nomeadamente sementes, fertilizantes, energia e água, bem como da volatilidade dos mercados agrícolas e da incerteza associada à remuneração da produção pecuária (Barreiros et al., 2018).

Acresce que o contexto recente de alterações climáticas e de crescente instabilidade meteorológica introduz novos elementos de incerteza relativamente à aptidão de determinadas áreas para a produção de milho, sobretudo em cenários marcados por maior irregularidade da precipitação e menor disponibilidade hídrica estival. Neste quadro, tem-se verificado um interesse crescente por estratégias que reforcem a eficiência do uso da água, como a modernização dos sistemas de rega e a adoção de práticas de gestão mais precisas, bem como abordagens de avaliação espacial que permitam identificar, com maior rigor, as áreas de maior aptidão para a cultura e apoiar a mitigação do risco produtivo (Barreiros et al., 2018). Assim, a evolução da cultura do milho na EDM deve ser interpretada não apenas como um processo de intensificação produtiva, mas também como uma realidade em

transformação, sujeita a pressões biofísicas, económicas e ambientais que justificam uma análise territorialmente diferenciada da sua aptidão e sustentabilidade.

2.2. Conceitos e aplicações de zonagem agroecológica

A zonagem agroecológica (ZAE) constitui um instrumento conceptual e operativo de particular relevância no âmbito do planeamento agrícola sustentável, na medida em que permite organizar o território em unidades relativamente homogêneas quanto às suas características climáticas, edáficas, fisiográficas e, em determinados casos, de uso e cobertura do solo. Esta compartimentação territorial possibilita a avaliação sistemática da aptidão agrícola das diferentes unidades de paisagem, bem como a identificação das respetivas potencialidades e limitações, apoiando a definição de estratégias de utilização mais eficiente e sustentável dos recursos naturais (FAO, 1996).

Em termos teóricos, a ZAE assenta na correspondência entre os requisitos ecológicos das culturas e as condições biofísicas do território. Deste modo, não se limita à simples descrição do ambiente físico, antes procura estabelecer uma relação funcional entre as exigências fisiológicas das plantas e os atributos ambientais locais, permitindo inferir níveis diferenciados de adequação para determinados usos agrícolas. Esta perspetiva integradora traduz-se numa ferramenta de apoio à decisão particularmente relevante em contextos de crescente pressão sobre os recursos, uma vez que possibilita orientar a escolha de culturas, variedades e práticas de manejo em função das especificidades de cada unidade territorial, promovendo simultaneamente a eficiência produtiva e a mitigação dos impactos ambientais (Dadrasi et al., 2023; FAO, 1996).

No plano metodológico, a FAO distingue diferentes níveis de análise no âmbito da zonagem agroecológica. A *Agro-ecological Zone* (AEZ) corresponde à unidade de mapeamento dos recursos naturais, definida pela combinação de características climáticas, edáficas e fisiográficas que conferem a uma dada área um conjunto específico de potencialidades e constrangimentos para determinados usos agrícolas. A *Agro-ecological Cell* (AEC), por sua vez, representa uma unidade de análise de maior detalhe, resultante da interseção única de variáveis ambientais, constituindo a base física a partir da qual se desenvolvem avaliações mais refinadas da aptidão agrícola (FAO, 1996). Esta estrutura hierarquizada permite conjugar uma leitura regional de conjunto com níveis de detalhe compatíveis com aplicações operacionais de maior precisão.

A crescente valorização da ZAE decorre do reconhecimento de que o desempenho das culturas resulta da interação complexa entre clima, solo e relevo, sendo insuficiente a análise isolada de cada um destes fatores. A produtividade agrícola, a estabilidade produtiva e a viabilidade de diferentes sistemas de uso do solo dependem, em larga medida, da forma como estas variáveis se articulam no espaço e no tempo. Assim, a avaliação agroecológica exige uma abordagem integradora, na qual os atributos biofísicos sejam analisados de forma conjunta e convertidos em classes comparáveis de adequação ou aptidão, permitindo apoiar decisões fundamentadas em bases territoriais objetivas (Zabel et al., 2014).

Do ponto de vista histórico, a ZAE contemporânea evolui a partir das metodologias de *Land Evaluation* desenvolvidas pela FAO nas décadas de 1970 e 1980, as quais estabeleceram um enquadramento sistemático para a classificação da aptidão das terras. Neste domínio, assumiram particular relevância as classes S1 (altamente adequada), S2 (moderadamente adequada), S3 (marginalmente adequada), N1 (não adequada, mas passível de melhoria) e N2 (não adequada), que continuam a constituir uma referência central nos exercícios de avaliação territorial. Posteriormente, (Sys et al., 1993), aprofundaram esta abordagem ao definirem limiares quantitativos para a avaliação das limitações climáticas, edáficas e topográficas, tornando o sistema mais operacional e comparável entre diferentes contextos agroecológicos. A ZAE atual representa, assim, uma extensão e atualização destas bases conceptuais, incorporando novas fontes de dados, maior capacidade analítica e instrumentos tecnológicos mais sofisticados.

Importa, contudo, distinguir a ZAE de outras metodologias afins. A *Land Evaluation* clássica da FAO apresenta uma perspetiva mais estática, baseada sobretudo na avaliação das condições biofísicas presentes, ao passo que muitas zonagens agrícolas de âmbito nacional recorrem a critérios simplificados, frequentemente associados a classificações administrativas ou edafoclimáticas generalistas (FAO, 2007). A ZAE, em sentido mais estrito, distingue-se por integrar variáveis dinâmicas, tais como a variabilidade climática intra e interanual, a condição funcional dos solos e, crescentemente, cenários climáticos futuros, permitindo avaliar não apenas a aptidão atual do território, mas também a sua possível evolução sob diferentes contextos ambientais (Upreti et al., 2025).

A incorporação de cenários climáticos futuros constitui um dos avanços mais relevantes na evolução recente da zonagem agroecológica. O sistema *Global Agro-Ecological Zones* (GAEZ) demonstra que variações em parâmetros como a acumulação térmica, a duração do período de crescimento ou a

disponibilidade hídrica podem induzir alterações significativas na aptidão das culturas, especialmente em espécies termossensíveis como o milho (Fischer, 2020; Fischer et al., 2012). A utilização de projeções climáticas provenientes do conjunto de modelos CMIP6, disponibilizadas através de bases de dados de elevada resolução espacial como o CHELSA, permite não só avaliar potenciais perdas de aptidão, como também identificar novas áreas com viabilidade produtiva. Perante cenários de redução de aptidão, torna-se essencial a adoção de estratégias de adaptação, nomeadamente o ajuste das datas de sementeira, a seleção de cultivares mais tolerantes ao stress térmico e o reforço da disponibilidade hídrica (Upreti et al., 2025). Neste contexto, a ZAE assume uma dimensão prospetiva, permitindo antecipar impactos e apoiar a definição de estratégias de adaptação territorial.

Em termos operacionais, a aplicação da ZAE recorre frequentemente a métodos multicritério que permitem ponderar variáveis ambientais de acordo com a sua importância relativa na determinação da aptidão agrícola. Entre os métodos mais utilizados destacam-se o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), amplamente sistematizado por (Malczewskik, 2005), e as abordagens de combinação ponderada em ambiente SIG, que possibilitam integrar, de forma transparente e reproduzível, diferentes camadas de informação espacial. A lógica *fuzzy* constitui igualmente uma metodologia relevante, na medida em que permite representar transições graduais entre classes de aptidão, em vez de impor limiares rígidos, o que se revela particularmente útil em contextos marcados por elevada variabilidade ambiental (Ahamed et al., 2000; Aryal & Shrestha, 2020). Mais recentemente, técnicas de aprendizagem automática, como *Random Forest* e *Gradient Boosting*, têm vindo a ser utilizadas para modelar relações não lineares entre atributos ambientais e produtividade, aumentando a precisão dos mapas de aptidão agrícola em diferentes culturas e contextos territoriais (Hengl et al., 2017; Strunk et al., 2020).

A operacionalização da ZAE para culturas anuais requer, em regra, uma sequência metodológica estruturada. Esta inicia-se com a compilação de dados climáticos de base, incluindo normais climatológicas, variabilidade intra-anual e tendências observadas ou projetadas; prossegue com a caracterização edáfica, nomeadamente profundidade efetiva, textura, drenagem, teor de matéria orgânica e reação do solo; incorpora o mapeamento fisiográfico, através de variáveis como declive, altitude e exposição; e culmina com a definição dos requisitos agroecológicos da cultura, traduzidos em termos de exigências térmicas, hídricas e edáficas (Kandari et al., 2013). A qualidade dos resultados obtidos depende, em larga medida, do rigor desta integração e da coerência entre a resolução dos dados utilizados e a escala da decisão que se pretende apoiar.

No caso do milho, a integração dos requisitos ecofisiológicos na ZAE reveste-se de especial importância, dado que esta cultura apresenta sensibilidade marcada a fatores térmicos e hídricos. O milho depende fortemente da acumulação de graus-dia, assumindo-se, de forma geral, uma temperatura base próxima dos 10 °C para o cálculo da duração do ciclo (Tollenaar & Lee, 2011). Para além disso, a fase pré-floração e o início do enchimento do grão constituem períodos particularmente críticos no que respeita à disponibilidade hídrica, podendo défices de curta duração comprometer significativamente a formação de grãos e o rendimento final (Coimbra, 2023). Do ponto de vista edáfico, profundidades superiores a 100 cm, texturas médias, valores de pH entre 5,5 e 7,5 e boa capacidade de retenção de água são frequentemente referidos como atributos preferenciais para maximizar o potencial produtivo da cultura (FAO, 2007; Sys et al., 1993). Estes critérios encontram eco nos parâmetros utilizados pelo GAEZ, que classifica o milho como cultura moderadamente exigente em água e particularmente sensível a limitações térmicas (Fischer et al., 2012).

Deste modo, a ZAE constitui mais do que um procedimento de compartimentação do território: representa uma abordagem analítica que permite interpretar a relação entre ambiente e cultura de forma funcional, espacialmente explícita e prospetiva. A sua aplicação ao milho revela-se particularmente pertinente em contextos de intensificação sustentável e de crescente variabilidade climática, na medida em que permite identificar áreas de maior aptidão, reconhecer limitações críticas e apoiar estratégias de adaptação técnica e territorialmente diferenciadas.

2.2.1. Integração de cenários climáticos na zonagem agroecológica

A integração de cenários climáticos na zonagem agroecológica decorre da necessidade de ultrapassar uma leitura exclusivamente estática da aptidão agrícola. Se a adequação de uma cultura depende fortemente de variáveis como a temperatura e a precipitação, então a avaliação do território deve necessariamente incorporar a possibilidade de alteração dessas condições ao longo do século XXI. Neste sentido, o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6) assume particular relevância, na medida em que sistematiza projeções produzidas no âmbito do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), permitindo analisar trajetórias plausíveis de evolução futura do sistema climático global (IPCC, 2021).

No quadro do CMIP6, as projeções são organizadas segundo as denominadas *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), que articulam pressupostos socioeconómicos com níveis de forçamento radiativo. O primeiro elemento da designação (SSP1 a SSP5) descreve diferentes trajetórias de desenvolvimento demográfico, económico, tecnológico e energético à escala global, ao passo que o segundo elemento numérico indica o nível aproximado de forçamento radiativo esperado para o ano de 2100, expresso em watts por metro quadrado (W/m^2), relativamente ao período pré-industrial (IPCC, 2021). Esta estrutura permite interpretar os cenários climáticos não apenas como projeções biofísicas, mas também como expressões de diferentes configurações socioeconómicas e de governação ambiental.

Assim, o cenário SSP2-4.5 corresponde a uma trajetória intermédia, caracterizada por crescimento moderado, continuidade parcial das tendências atuais e políticas climáticas mitigadoras, conduzindo a um forçamento radiativo próximo de $4,5 \text{ W/m}^2$ até ao final do século. Já o cenário SSP5-8.5 assenta numa trajetória de forte crescimento económico e elevada dependência de combustíveis fósseis, originando um forçamento radiativo de cerca de $8,5 \text{ W/m}^2$ em 2100 (IPCC, 2021). As diferenças entre estes cenários traduzem-se em magnitudes distintas de aquecimento global e de alteração dos regimes de precipitação, com repercussões diretas sobre a disponibilidade térmica e hídrica dos territórios agrícolas.

Todavia, a utilização direta de modelos climáticos globais em estudos de âmbito territorial enfrenta limitações associadas à sua resolução espacial relativamente grosseira. Esta limitação torna particularmente difícil a sua aplicação em regiões de elevada heterogeneidade topográfica e microclimática, como sucede em muitas áreas do Noroeste português. Para ultrapassar este constrangimento, recorre-se frequentemente a bases de dados climaticamente ajustadas e espacialmente refinadas, como a CHELSA v2.1, que disponibiliza projeções derivadas do CMIP6 com maior detalhe espacial e com correções estatísticas que incorporam, de forma explícita, efeitos orográfico relevantes (Karger et al., 2017).

A utilização conjunta do enquadramento conceptual do AR6 e de bases de dados de alta resolução como a CHELSA permite, assim, incorporar cenários climáticos futuros na zonagem agroecológica de forma metodologicamente mais robusta. A aptidão agrícola deixa, deste modo, de refletir apenas as condições médias atuais, passando a integrar possíveis alterações futuras na temperatura, na precipitação, na acumulação térmica e na duração do período de crescimento. Esta perspetiva é particularmente relevante para culturas como o milho, cuja performance está fortemente associada à

disponibilidade térmica e hídrica. Em consequência, a inclusão de cenários climáticos na ZAE não constitui apenas um refinamento metodológico, mas antes uma condição essencial para produzir avaliações territorialmente relevantes e temporalmente mais realistas num contexto de mudança climática.

2.3. Indicadores biofísicos

A avaliação da aptidão agrícola de um território exige a consideração articulada dos principais fatores biofísicos que condicionam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Entre esses fatores, assumem particular importância o clima, o relevo e o solo, cuja interação molda o ambiente físico e biológico em que os sistemas agrícolas se organizam. A literatura dedicada à zonagem agroecológica tem demonstrado que nenhum destes elementos atua isoladamente: a resposta das culturas resulta, antes, da forma como as condições térmicas e hídricas, a morfologia do terreno e as propriedades edáficas se combinam no espaço, definindo diferentes níveis de aptidão ou limitação para o uso agrícola (FAO, 1996; Fischer et al., 2012).

Neste sentido, a caracterização biofísica constitui uma etapa essencial em qualquer exercício de avaliação territorial orientado para o planeamento agrícola. Para além de permitir descrever o ambiente produtivo, esta caracterização cria as bases analíticas necessárias para compreender o comportamento das culturas, antecipar respostas fisiológicas, identificar limitações estruturais e apoiar decisões de manejo mais ajustadas às especificidades de cada contexto. Em estudos de zonagem agroecológica, estes indicadores assumem, por isso, um papel estruturante, funcionando como suporte à delimitação de unidades homogêneas e à definição de classes de aptidão agrícola (Fischer, 2020).

2.3.1. Indicadores bioclimáticos

O clima constitui, em regra, o primeiro domínio analítico considerado na avaliação da aptidão agrícola, uma vez que condiciona diretamente os processos fisiológicos fundamentais ao crescimento vegetal. Variáveis como a temperatura do ar, a precipitação, a radiação solar e a ocorrência de geadas influenciam a duração do ciclo cultural, a acumulação de biomassa, a expressão fenológica e, em última instância, a produtividade potencial das culturas. Os estudos dedicados ao mapeamento da aptidão agrícola mostram, de forma consistente, que estas variáveis são determinantes para definir não apenas

onde uma cultura pode ser instalada, mas também o nível de desenvolvimento que pode atingir em diferentes contextos territoriais (Kandari et al., 2013; Nabati et al., 2023).

No caso particular do milho, a disponibilidade térmica assume especial importância, dado que esta cultura depende fortemente da acumulação de graus-dia para progredir entre os diferentes estádios fenológicos. Alterações na temperatura média podem traduzir-se em modificações significativas na duração do ciclo cultural, influenciando o ritmo de emergência, o crescimento vegetativo, a floração e o enchimento do grão (Coimbra, 2023; Tollenaar & Lee, 2011). Paralelamente, as necessidades hídricas da cultura são particularmente relevantes em fases críticas, designadamente durante a floração e o início do enchimento do grão, períodos em que défices de água podem comprometer de forma acentuada o rendimento final (Coimbra, 2023).

Em regiões atlânticas do Noroeste Peninsular, caracterizadas por verões moderados e precipitação anual elevada, o milho tende a encontrar condições relativamente favoráveis, desde que o excesso de humidade não comprometa a drenagem do solo ou a operacionalidade das práticas culturais. Este equilíbrio entre energia térmica disponível e provisão hídrica é frequentemente apontado como determinante da aptidão da cultura. O caso da EDM ilustra de forma clara esta relação: inserida num regime climático atlântico húmido, com precipitações anuais frequentemente superiores a 1 200 mm, verões de moderada intensidade térmica e invernos chuvosos, a região oferece condições propícias ao desenvolvimento do milho, sobretudo quando articuladas com solos de adequada profundidade e capacidade de drenagem (IPMA, 2021). Estas características ajudam a explicar a forte tradição do cultivo de milho na região e a sua persistência enquanto base forrageira dos sistemas leiteiros locais.

2.3.2. Indicadores edáficos

As propriedades do solo constituem um dos pilares fundamentais da aptidão agrícola, uma vez que condicionam a disponibilidade de água e nutrientes, o desenvolvimento radicular, a aeração, a estabilidade estrutural e a capacidade de suporte das culturas. As variáveis como a profundidade efetiva, a textura, a drenagem interna, o teor de matéria orgânica, a capacidade de retenção de água e a reação do solo influenciam diretamente o desempenho das culturas e devem, por isso, ser consideradas de forma sistemática em qualquer exercício de zonagem agroecológica (FAO, 2007; Sys et al., 1993).

No caso do milho, a qualidade edáfica assume importância decisiva, atendendo à exigência da cultura em termos de exploração radicular, disponibilidade hídrica e resposta à fertilização. Solos profundos, bem drenados, com texturas médias a moderadamente finas e adequada capacidade de armazenamento de água tendem a favorecer o desenvolvimento da cultura, sobretudo em fases de maior exigência fisiológica. Em contrapartida, solos rasos, excessivamente compactados, com drenagem deficiente ou textura extrema podem limitar o crescimento radicular, agravar o stress hídrico ou favorecer problemas de encharcamento, com reflexos negativos na produtividade e na estabilidade do sistema cultural (FAO, 2007; Tollenaar & Lee, 2011).

Na EDM, a componente edáfica apresenta assinalável diversidade, associada à heterogeneidade litológica e geomorfológica do território. Os cambissolos húmicos e dístricos são frequentes em diferentes setores da região, coexistindo com solos aluviais nas áreas de vale, geralmente mais profundos e férteis, que têm historicamente sustentado grande parte da atividade agrícola mais intensiva. Esta base edáfica, quando articulada com condições climáticas favoráveis e relevo adequado, contribui para explicar a aptidão do território para a produção de milho, sobretudo nas zonas de várzea e em áreas com possibilidade de gestão hídrica mais controlada (INIAV, 2019). A análise dos solos revela-se, assim, indispensável não apenas para descrever o ambiente agrícola, mas também para compreender as limitações e oportunidades concretas associadas à instalação e ao desempenho da cultura.

2.3.3. Indicadores fisiográficos

O relevo e a fisiografia constituem elementos fundamentais na avaliação agroecológica, embora, em determinados contextos de escala, a sua influência possa apresentar-se de forma menos evidente do que a dos fatores climáticos. A morfologia do terreno condiciona o escoamento superficial da água, a exposição solar, a profundidade efetiva dos solos, a suscetibilidade à erosão e a viabilidade da mecanização agrícola. Por esse motivo, a FAO sublinha, nos seus manuais de avaliação das terras, a importância de considerar variáveis como altitude, declive e exposição das vertentes entre outros fatores, dado o seu efeito na modificação do microclima local e na dinâmica hídrica e erosiva do solo (FAO, 2007).

Entre os indicadores fisiográficos, o declive assume especial relevância por funcionar simultaneamente como condicionante biofísica e operacional. Os declives mais acentuados tendem a aumentar o risco de escorrência, erosão e perda de nutrientes, ao mesmo tempo que dificultam as operações de mobilização, sementeira, tratamento e colheita, comprometendo a eficiência técnica e económica da atividade agrícola (Kandari et al., 2013).

Nos últimos anos, o desenvolvimento de ferramentas de análise espacial e de modelos digitais do terreno permitiu incorporar, com maior sofisticação, indicadores derivados e de natureza mais complexa, como o *Topographic Wetness Index* (TWI), que contribui para identificar áreas com maior propensão ao encharcamento ou à acumulação de humidade, aspetos particularmente relevantes em regiões de clima húmido e relevo variável (Hengl et al., 2017).

No EDM, o relevo exerce influência determinante na distribuição espacial da aptidão agrícola. As várzeas associadas aos vales dos rios Ave, Cávado e Lima constituem áreas privilegiadas para a atividade agrícola, em virtude da presença de solos profundos, frequentemente aluviais, de relevo pouco acentuado e com condições favoráveis à mecanização e, em muitos casos, à rega. Em contraste, as encostas, frequentemente associadas a substratos graníticos e a declives mais pronunciados, apresentam limitações associadas à erosão, à menor profundidade útil do solo e à menor capacidade de retenção de água, tornando menos favorável a instalação de culturas anuais mais exigentes, como o milho (Norte, 2009). Assim, a leitura fisiográfica do território revela-se indispensável para compreender a distribuição das áreas de maior aptidão e para fundamentar propostas de uso agrícola mais ajustadas às condições locais.

2.3.4. Integração dos indicadores biofísicos

A utilidade analítica dos indicadores biofísicos resulta, em larga medida, da sua integração. A combinação entre clima, relevo e solo permite construir uma leitura territorial mais próxima das necessidades reais das culturas, superando abordagens parcelares ou excessivamente simplificadas. Nos estudos de zonagem agroecológica, esta integração é frequentemente realizada através de métodos multicritério e de técnicas de análise espacial que normalizam variáveis, estabelecem limiares de adequação e atribuem pesos relativos em função da importância de cada fator na determinação da aptidão agrícola (Malczewski, 2005).

Diversos trabalhos aplicados à cultura do milho evidenciam que esta abordagem integrada é indispensável para distinguir áreas de elevada aptidão de outras condicionadas por limitações térmicas, declives excessivos, má drenagem ou reduzida profundidade do solo (Coimbra, 2023; Kandari et al., 2013; Nabati et al., 2023). No contexto da EDM, esta integração assume particular pertinência, dada a forte heterogeneidade territorial que caracteriza a região. A combinação entre clima húmido e moderado, solos com aptidão variável e unidades de relevo contrastadas explica a coexistência de áreas particularmente favoráveis ao cultivo do milho com outras onde a cultura se encontra mais exposta a constrangimentos biofísicos.

Os relatórios regionais de acompanhamento agrícola têm vindo a sublinhar que as várzeas irrigadas e os fundos de vale, suportados por solos aluviais ou por outros solos de boa capacidade de retenção de água, reúnem condições historicamente favoráveis à cultura, sobretudo quando associados a relevo pouco acentuado e possibilidade de mecanização eficiente (Norte, 2023). Assim, a integração dos indicadores biofísicos não constitui apenas um exercício metodológico; representa, antes, o fundamento analítico necessário para compreender a lógica territorial da aptidão agrícola e para sustentar propostas de planeamento mais robustas, mais diferenciadas e mais ajustadas às especificidades da bacia leiteira do Entre Douro e Minho.

2.4. Índices de vegetação e curvas fenológicas

Os índices de vegetação constituem instrumentos fundamentais na monitorização remota das culturas, na medida em que sintetizam a resposta radiométrica do coberto vegetal e permitem acompanhar, de forma espacialmente explícita e temporalmente consistente, a evolução fenológica, o estado fisiológico e a variabilidade intra e interparcelar do desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo produtivo. Estes índices resultam de combinações matemáticas entre bandas do espectro visível, do infravermelho próximo e, em alguns casos, do infravermelho de ondas curtas, funcionando como métricas robustas para caracterizar o vigor vegetativo, a atividade fotossintética, o estado nutricional e a condição hídrica da vegetação. A análise integrada de séries temporais destes índices permite, por sua vez, extrair métricas fenológicas como o início do crescimento ativo, o momento de máximo desenvolvimento, a amplitude da curva e o início da senescência, as quais, quando relacionadas com a fisiologia da cultura, constituem uma base sólida para avaliar o comportamento produtivo e a resposta das plantas às práticas culturais e às condições ambientais (Althoff et al., 2018; Neves, 2023).

Entre os índices de vegetação mais amplamente utilizados destaca-se o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), baseado no contraste entre a elevada refletância no infravermelho próximo e a forte absorção da radiação na banda do vermelho por parte dos tecidos fotossinteticamente ativos. O NDVI apresenta, em regra, um aumento rápido após a emergência da cultura, acompanhando a expansão da área foliar e a acumulação de biomassa, até atingir valores máximos nas fases de maior atividade fotossintética. Contudo, em estádios avançados do ciclo, quando o dossel vegetal se torna particularmente denso, este índice tende a saturar, reduzindo a sua capacidade discriminativa para detetar diferenças estruturais ou alterações subtis no teor de clorofila. Por essa razão, o NDVI é frequentemente complementado por outros índices mais sensíveis em situações de elevada biomassa (Neves, 2023; Neves et al., 2025).

O NDRE (*Normalized Difference Red Edge*) constitui um avanço relevante neste domínio, na medida em que utiliza a banda *red-edge*, mais sensível ao conteúdo de clorofila e ao estado nutricional do dossel vegetal. Ao contrário do NDVI, o NDRE mantém poder discriminativo em coberturas vegetais densas, sendo particularmente útil para identificar gradientes nutricionais, nomeadamente associados ao azoto, em fases intermédias e avançadas do desenvolvimento do milho, como entre V6 e V12 e nos primeiros estádios do enchimento do grão (Althoff et al., 2018; Neves et al., 2025). A sua capacidade para detetar alterações fisiológicas precoces torna-o particularmente relevante para identificar áreas com menor vigor ou sinais iniciais de declínio funcional da cultura (Aires, 2022).

O NDWI (*Normalized Difference Water Index*) é amplamente utilizado para avaliar variações no estado hídrico da vegetação, explorando a relação espectral entre bandas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas. Este índice apresenta sensibilidade a alterações no conteúdo hídrico do coberto vegetal e permite distinguir diferenças espaciais associadas a condições hídricas contrastantes ao longo do ciclo cultural. No caso do milho, o NDWI constitui um complemento importante aos índices de vigor vegetativo, permitindo enriquecer a interpretação dos padrões observados, sobretudo em períodos de maior exigência hídrica ou em contextos de forte variabilidade intraparcelar das condições de disponibilidade de água (Althoff et al., 2018; Neves, 2023).

O GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) utiliza a banda verde em substituição da banda vermelha, apresentando maior sensibilidade ao teor de clorofila e à atividade fotossintética do dossel, especialmente em fases intermédias do ciclo em que os pigmentos foliares atingem concentrações elevadas. Esta característica torna-o particularmente útil para captar variações

fisiológicas subtis em períodos de intensa atividade metabólica, contribuindo para a avaliação do vigor e da uniformidade da cultura em momentos críticos do seu desenvolvimento (Aires, 2022; Althoff et al., 2018).

O EVI (*Enhanced Vegetation Index*) foi concebido para reduzir a influência dos efeitos atmosféricos e do fundo do solo, incorporando coeficientes de correção que atenuam o fenômeno de saturação frequentemente observado no NDVI em culturas com elevada densidade foliar. Em culturas como o milho, cujo dossel pode atingir valores elevados de biomassa e cobertura, o EVI tende a manter maior capacidade discriminativa em estádios avançados de desenvolvimento, constituindo uma alternativa robusta para a monitorização do vigor vegetativo em fases de maior densidade estrutural (Althoff et al., 2018; Neves et al., 2025).

O SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) foi desenvolvido com o objetivo de reduzir a influência do solo exposto na resposta espectral da vegetação, sendo particularmente adequado em fases iniciais do ciclo cultural, quando a cobertura vegetal ainda é escassa e a contribuição do fundo edáfico para o sinal do sensor é mais expressiva. Ao introduzir um fator de correção, este índice melhora a estabilidade da avaliação do vigor vegetativo em situações de baixa densidade foliar, constituindo uma alternativa relevante ao NDVI nos primeiros estádios de desenvolvimento do milho (Althoff et al., 2018).

O RDVI (*Renormalized Difference Vegetation Index*) procura aumentar a sensibilidade em condições de elevada biomassa, reduzindo os efeitos de saturação associados ao NDVI. Mantendo a lógica de contraste entre a banda do vermelho e o infravermelho próximo, este índice incorpora uma renormalização que permite discriminar, com maior eficácia, diferenças de vigor em coberturas vegetais densas, sendo, por isso, útil em fases do ciclo em que o dossel do milho se encontra plenamente desenvolvido (Althoff et al., 2018).

O VDVI (*Visible Difference Vegetation Index*), por seu turno, baseia-se exclusivamente em bandas do espectro visível, explorando a relação entre verde, vermelho e azul para avaliar o vigor da vegetação. Embora menos robusto do que índices que recorrem ao infravermelho próximo, o VDVI pode assumir utilidade em contextos em que apenas estão disponíveis imagens RGB, permitindo identificar variações no grau de “verdor” do coberto vegetal e, por essa via, inferir diferenças no seu estado fisiológico (Althoff et al., 2018).

Os índices SIPI (*Structure Insensitive Pigment Index*) e PSRI (*Plant Senescence Reflectance Index*) fornecem informação associada à composição e à evolução dos pigmentos foliares. O SIPI está relacionado com a razão entre carotenoides e clorofila, permitindo acompanhar alterações na estrutura pigmentária do dossel. O PSRI, por sua vez, revela elevada sensibilidade à degradação da clorofila e ao aumento relativo dos carotenoides, sendo frequentemente utilizado para identificar processos de envelhecimento foliar e fases de senescência da vegetação (Aires, 2022). Estes índices assumem especial interesse em análises orientadas para a compreensão da transição entre o máximo desenvolvimento vegetativo e o início do declínio funcional da cultura.

O MSI (*Moisture Stress Index*) é utilizado para avaliar o estado hídrico da vegetação através da relação entre bandas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas, apresentando sensibilidade a variações no conteúdo de água das folhas. A sua aplicação permite identificar situações de stress hídrico e reconhecer padrões espaciais associados a diferentes condições de humidade do dossel vegetal, constituindo um indicador complementar relevante em estudos que procuram relacionar a dinâmica fenológica do milho com a disponibilidade hídrica ao longo do ciclo cultural (Neves, 2023).

No âmbito da monitorização remota da cultura do milho, a seleção dos índices de vegetação (descritos no quadro 2.1) deve atender à natureza biofísica dos processos que se pretendem analisar, designadamente o vigor vegetativo, a atividade fotossintética, o estado hídrico, a dinâmica dos pigmentos foliares e os processos de senescência. Cada índice resulta de combinações específicas entre bandas espectrais e apresenta sensibilidade diferenciada a determinados atributos do dossel vegetal. Neste sentido, a utilização articulada de vários índices permite uma leitura mais abrangente e robusta da resposta espectral da cultura ao longo do ciclo produtivo, reforçando a capacidade de interpretar padrões fenológicos, diferenças fisiológicas e variações intraparcelsares com relevância agronómica.

Quadro 2.1. Índices de vegetação utilizados no estudo, respetivas fórmulas matemáticas, bandas espectrais e principal interpretação agronómica

Índice de vegetação	Abreviatura	Fórmula matemática	Bandas espectrais utilizadas	Principal interpretação agronómica
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	NDVI	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$	Infravermelho próximo (NIR); vermelho (RED)	Indicador geral do vigor vegetativo e da biomassa verde.

Índice de vegetação Abreviatura		Fórmula matemática	Bandas espectrais utilizadas	Principal interpretação agronómica
<i>Enhanced Vegetation Index</i>	EVI	$2.5 \times (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + 6 \times \text{RED} - 7.5 \times \text{BLUE} + 1)$	Infra-vermelho próximo (NIR); vermelho (RED); azul (BLUE)	Índice de vigor vegetativo com menor influência atmosférica e menor sensibilidade ao efeito do solo, particularmente útil em cobertos vegetais densos.
<i>Normalized Difference Index</i>	<i>Water</i> NDWI	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	Infra-vermelho próximo (NIR); infra-vermelho de ondas curtas (SWIR)	Indicador do estado hídrico da vegetação e do conteúdo de água no dossel.
<i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i>	GNDVI	$(\text{NIR} - \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{GREEN})$	Infra-vermelho próximo (NIR); verde (GREEN)	Índice sensível ao teor de clorofila e à atividade fotossintética da vegetação.
<i>Red Edge Normalized Difference Vegetation Index</i>	NDRE1	$(\text{NIR} - \text{RE1}) / (\text{NIR} + \text{RE1})$	Infra-vermelho próximo (NIR); red-edge (RE1)	Índice adequado à avaliação de vegetação com elevada biomassa, particularmente sensível a variações no teor de clorofila.
<i>Red Edge Normalized Difference Vegetation Index</i>	NDRE2	$(\text{NIR} - \text{RE2}) / (\text{NIR} + \text{RE2})$	Infra-vermelho próximo (NIR); red-edge (RE2)	Índice semelhante ao NDRE1, permitindo captar diferenças fisiológicas subtis em estádios mais avançados de desenvolvimento.
<i>Renormalized Difference Vegetation Index</i>	RDVI	$(\text{NIR} - \text{RED}) / \sqrt{(\text{NIR} + \text{RED})}$	Infra-vermelho próximo (NIR); vermelho (RED)	Índice de vigor vegetativo com maior sensibilidade em situações de elevada densidade foliar.
<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>	SAVI	$[(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + \text{L})] \times (\text{NIR}) / (1 + \text{L})$, com $\text{L} = 0.5$	Infra-vermelho próximo (NIR); vermelho (RED)	Índice ajustado ao efeito do solo, particularmente útil em fases iniciais da cultura ou em cobertos pouco densos.
<i>Visible Difference Vegetation Index</i>	VDVI	$(2 \times \text{GREEN} - \text{RED} - \text{BLUE}) / (2 \times \text{GREEN} + \text{RED} + \text{BLUE})$	Verde (GREEN); vermelho (RED); azul (BLUE)	Índice baseado apenas em bandas do espectro visível, útil na avaliação do vigor vegetativo quando apenas estão disponíveis imagens RGB.
<i>Structure Insensitive Pigment Index</i>	SIPI	$(\text{NIR} - \text{BLUE}) / (\text{NIR} - \text{RED})$	Infra-vermelho próximo (NIR); azul (BLUE); pigmentos foliares, em particular à	Índice associado à composição dos pigmentos foliares, em particular à

Índice de vegetação	Abreviatura	Fórmula matemática	Bandas espectrais utilizadas	Principal interpretação agronômica
			vermelho (RED)	relação entre carotenoides e clorofila.
<i>Plant Senescence Reflectance Index</i>	PSRI	$(RED - BLUE) / RE$	Vermelho (RED); azul (BLUE); red-edge (RE)	Índice sensível aos processos de senescência e à degradação progressiva da clorofila.

Fonte: elaboração própria com base em Aires (2022), Althoff et al. (2018), Neves (2023) e Neves et al. (2025).

Nota: NIR = *Near Infrared* (infravermelho próximo); RED = banda do vermelho; GREEN = banda do verde; BLUE = banda do azul; SWIR = *Short-Wave Infrared* (infravermelho de ondas curtas); RE = *Red Edge*. Nos casos em que se utilizam bandas *red-edge* específicas, estas são identificadas como RE1 e RE2, de acordo com a banda espectral considerada. O parâmetro *L*, utilizado no SAVI, corresponde ao fator de correção do efeito do solo, tendo sido adotado o valor 0,5, conforme prática corrente na literatura para cobertos vegetais de densidade intermédia.

A leitura do Quadro 2.1 evidencia que os índices selecionados não são funcionalmente equivalentes, antes respondendo a diferentes dimensões biofísicas do comportamento da cultura. Enquanto índices como o NDVI, o EVI, o RDVI e o SAVI orientam-se sobretudo para a avaliação do vigor vegetativo e da densidade do coberto, outros, como o GNDVI, o NDRE1 e o NDRE2, apresentam maior sensibilidade à clorofila e à atividade fotossintética. Por sua vez, o NDWI e o MSI, quando incluído na análise, reforçam a leitura do estado hídrico da vegetação, ao passo que o SIPI e o PSRI fornecem informação particularmente relevante sobre a composição pigmentária e os processos de senescência.

Deste modo, a utilização combinada destes índices permite construir uma interpretação mais completa da dinâmica fenológica do milho, na medida em que possibilita captar, de forma complementar, alterações estruturais, fisiológicas e funcionais do dossel vegetal. Esta abordagem revela-se especialmente pertinente em estudos baseados em séries temporais multiespectrais, nos quais a articulação entre diferentes índices reforça a robustez da análise e contribui para uma leitura mais fina da variabilidade espacial e temporal da cultura ao longo do seu ciclo de desenvolvimento.

Para além da interpretação isolada de cada índice, importa sublinhar que a sua maior utilidade científica e operacional emerge da análise temporal das respetivas curvas fenológicas. Nas séries temporais, a cultura do milho tende a exibir um padrão espectral característico: uma fase inicial de valores relativamente baixos após a sementeira, seguida de aumento progressivo durante o desenvolvimento vegetativo, um pico correspondente ao máximo desenvolvimento do dossel e, posteriormente, uma fase de declínio associada à maturação e à senescência. A forma, a amplitude e a duração destas curvas

podem variar em função da data de sementeira, do grupo de precocidade do híbrido, das condições meteorológicas, da disponibilidade hídrica, do estado nutricional e das práticas de manejo. Deste modo, a leitura das curvas fenológicas permite não apenas identificar estádios do ciclo cultural, mas também inferir diferenças de comportamento produtivo entre parcelas e zonas agroecológicas distintas (Aires, 2022; Neves et al., 2025)..

Neste enquadramento, a utilização combinada de vários índices de vegetação reforça a robustez da análise fenológica, permitindo captar diferentes dimensões do comportamento da cultura, desde o vigor vegetativo e o teor de clorofila até à condição hídrica e à senescência foliar. Tal abordagem revela-se especialmente pertinente em estudos de zonagem agroecológica e monitorização do milho, na medida em que possibilita relacionar a resposta espectral da cultura com os fatores biofísicos do território e com a variabilidade espacial do seu desempenho agronómico (Aires, 2022; Neves, 2023; Neves et al., 2025).

2.5. Análise de séries temporais na agricultura

A incorporação das geotecnologias na agricultura tem vindo a transformar profundamente os modos de observação, análise e gestão dos sistemas produtivos, ao introduzir novas possibilidades de monitorização espacialmente explícita e temporalmente contínua das culturas. Esta transformação não decorre apenas da evolução dos sensores, das plataformas de aquisição e das infraestruturas computacionais, mas sobretudo da capacidade crescente de integrar, num mesmo enquadramento analítico, dados de natureza espacial, espectral e temporal. Neste sentido, a agricultura contemporânea tende a apoiar-se, de forma cada vez mais sistemática, em processos de observação remota, tratamento geoespacial de informação e modelação orientada por dados, consolidando o papel das geotecnologias como suporte fundamental à agricultura digital e à intensificação sustentável da produção (Martini & Souza, 2024; Segarra et al., 2020).

Nos últimos anos, a expansão do acesso a dados de observação da Terra constituiu um dos fatores mais relevantes para esta evolução. Programas como o Copernicus, através da disponibilização aberta de imagens multiespectrais de elevada qualidade radiométrica, resolução espacial adequada e frequência temporal compatível com o acompanhamento dos ciclos culturais, contribuíram decisivamente para democratizar o uso de informação geoespacial no domínio agrícola. Esta disponibilidade de dados veio

reforçar a capacidade de observação sistemática das culturas e permitir abordagens analíticas mais robustas, orientadas não apenas para a descrição do estado da vegetação em momentos específicos, mas também para a compreensão da sua dinâmica ao longo do tempo. Deste modo, a produção agrícola moderna depende, em medida crescente, da capacidade de gerar, integrar e interpretar informação geoespacial com elevado valor operacional (Martini & Souza, 2024; Segarra et al., 2020).

Neste quadro, a monitorização remota assume-se como um dos pilares centrais da agricultura de precisão. Ao medir a radiação refletida e, em certos contextos, emitida pela vegetação em diferentes bandas do espectro eletromagnético, torna-se possível inferir propriedades fisiológicas, estruturais e bioquímicas da planta, essenciais à avaliação do seu estado vegetativo e funcional. Sensores como os instalados nas missões Sentinel-2, Landsat-8/9 ou CBERS-4A disponibilizam bandas particularmente relevantes para a análise agrícola, nomeadamente nas regiões do vermelho, do infravermelho próximo e da *red-edge*, permitindo detetar variações associadas ao teor de clorofila, ao índice de área foliar, à estrutura do dossel e ao estado hídrico da vegetação. Por essa razão, estes sensores são particularmente adequados ao acompanhamento fenológico de culturas anuais e perenes, bem como à identificação de heterogeneidade intraparcelar com relevância agronómica (Martini & Souza, 2024; Segarra et al., 2020).

A utilidade destes sistemas de observação reside não apenas na qualidade espectral de cada imagem, mas sobretudo na sua capacidade de observação repetida ao longo do tempo, condição essencial para captar a dinâmica vegetativa das culturas. Neste âmbito, os índices de vegetação, como o NDVI, o EVI ou o NDRE, assumem um papel central, ao sintetizarem de forma operacional a resposta espectral do coberto vegetal e ao permitirem inferir, com relativa robustez, o vigor da vegetação, a densidade foliar e a atividade fotossintética (Bhatti et al., 2024). Embora a aplicação isolada destes índices produza indicadores úteis sobre o estado da cultura num dado momento, é na sua organização em séries temporais que a sua capacidade analítica se amplia de forma substancial. Com efeito, a análise temporal dos índices permite seguir tendências, identificar desvios, detetar transições fenológicas e associar alterações espectrais a eventos agronomicamente significativos, como a instalação da cultura, a expansão vegetativa, a floração, o enchimento do grão ou a senescência. Deste modo, a sucessão de valores espectrais ao longo do ciclo produtivo tende a configurar perfis temporais característicos, que podem ser interpretados como verdadeiras “assinaturas fenológicas” das culturas (Mouta et al., 2023; Segarra et al., 2020).

A relevância das séries temporais torna-se particularmente evidente quando a dimensão fenológica é integrada na análise espacial. A incorporação da evolução temporal dos índices permite ultrapassar abordagens baseadas em imagens pontuais, frequentemente limitadas na sua capacidade de distinguir comportamentos produtivos contrastantes. Torney et al. (2025) demonstram que diferentes fases do ciclo cultural apresentam assinaturas espectrais suficientemente distintas para permitir segmentações intraparcels consistentes, evidenciando que a dimensão temporal acrescenta informação discriminativa essencial à delimitação de unidades homogêneas de comportamento. Neste contexto, a presença de bandas *red-edge* no Sentinel-2 assume especial relevância, na medida em que melhora a deteção de variações na atividade fotossintética e no teor de clorofila em fases de transição fenológica. Assim, o trabalho com séries temporais completas, em vez de observações isoladas, aumenta a capacidade de identificar zonas com comportamento agronómico diferenciado e reforça a base empírica para intervenções de gestão mais ajustadas (Torney et al., 2025).

A importância metodológica das séries temporais tem sido demonstrada também em domínios não estritamente agrícolas, nomeadamente em estudos de monitorização de vegetação invasora e de dinâmica de cobertos vegetais em ecossistemas complexos. Trabalhos como o de (Mouta et al., 2023), mostram que a incorporação da evolução temporal dos índices de vegetação e das bandas espectrais melhora de forma significativa a capacidade de deteção e classificação, sobretudo quando associada a métodos de fusão de classificadores. Embora desenvolvidos em contextos ecológicos distintos, estes resultados possuem clara relevância metodológica para a agricultura, uma vez que demonstram que a componente temporal contém informação crítica sobre os padrões de desenvolvimento da vegetação que dificilmente pode ser captada através da análise de imagens isoladas. Tal constatação reforça a ideia de que o tempo constitui uma dimensão analítica incontornável na interpretação do comportamento das culturas e na modelação da sua variabilidade espacial.

A organização, tratamento e exploração destes dados exigem, por sua vez, plataformas capazes de operacionalizar de forma integrada a componente espacial e a componente temporal da informação. É neste domínio que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) assumem um papel estruturante. Para além de permitirem a recolha, harmonização e armazenamento de múltiplas camadas de informação (incluindo dados de observação remoto, atributos do solo, modelos digitais de elevação, variáveis meteorológicas e limites parcelares), os SIG oferecem um ambiente analítico propício à modelação espacial, à produção cartográfica e ao suporte à decisão agrícola. A sua utilidade estende-se desde a construção de mapas temáticos e a identificação de padrões territoriais até à delimitação de zonas de

intervenção e ao planeamento de práticas agronómicas diferenciadas, constituindo hoje infraestruturas centrais na agricultura digital (Alonso et al., 2003; Martini & Souza, 2024).

Paralelamente, a análise orientada a objetos (*Object-Based Image Analysis* – OBIA) tem vindo a afirmar-se como uma alternativa metodológica relevante aos métodos tradicionais baseados em píxeis. Ao agrupar píxeis espectralmente e espacialmente semelhantes em objetos com maior coerência geométrica e temática, esta abordagem tende a representar de forma mais próxima a realidade observada no terreno, reduzindo ruído e melhorando a precisão das classificações (Alvarez-Taboada et al., 2017). Quando articulada com séries temporais, a OBIA permite acompanhar a evolução do mesmo padrão de vegetação ao longo do tempo, favorecendo a identificação de áreas da parcela com comportamento semelhante e contribuindo para a definição de unidades de gestão mais robustas, estáveis e operacionalmente úteis.

Os algoritmos de aprendizagem automática complementam este quadro metodológico, oferecendo capacidade acrescida para modelar relações complexas entre variáveis espectrais, fenológicas e ambientais. Modelos como *Random Forest* têm demonstrado ganhos significativos de desempenho quando alimentados com dados multitemporais, precisamente porque conseguem captar relações não lineares e interações entre fatores que escapam a abordagens analíticas mais convencionais. A integração de séries temporais com técnicas de *machine learning* tem vindo, assim, a melhorar a qualidade das classificações, a robustez das estimativas de produtividade e a capacidade de deteção precoce de situações de stress, disponibilizando ferramentas preditivas mais adaptáveis à variabilidade intra-anual e interanual que caracteriza os sistemas agrícolas (Wang et al., 2024).

Todas estas abordagens convergem, em última instância, na delimitação de zonas de gestão, um dos instrumentos mais relevantes da agricultura de precisão contemporânea. A definição destas zonas assenta no princípio de que a variabilidade intraparcelar não é aleatória, podendo ser identificada, descrita e operacionalizada através da integração de múltiplas fontes de informação. Neste domínio, Torney et al. (2025) mostram que a conjugação entre séries temporais Sentinel-2, dados de solo e informação fenológica, analisada com recurso a métodos de clustering, permite produzir mapas de variabilidade intraparcelar mais consistentes e agronomicamente mais interpretáveis. Esta evidência reforça a ideia de que a dimensão temporal não constitui apenas um complemento da análise espacial, mas antes uma componente indispensável para a compreensão aprofundada dos sistemas agrícolas e para a construção de modelos de gestão mais precisos, adaptativos e territorialmente ajustados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia leiteira primária do Entre Douro e Minho, constituída por dez concelhos: Viana do Castelo, Esposende, Barcelos, Póvoa de Varzim, Vila Nova de Famalicão, Vila do Conde, Santo Tirso, Trofa, Maia e Matosinhos, abrangendo uma área total aproximada de 142 000 hectares (ha) (Figura 3.1).

A bacia leiteira primária do Entre Douro e Minho insere-se numa região de clima temperado húmido, fortemente influenciada pelo Atlântico. As normais climatológicas indicam valores de precipitação anual frequentemente superiores a 1 200 mm, com maior concentração nos meses de outono e inverno, e temperaturas moderadas ao longo do ano, caracterizadas por verões amenos e reduzida amplitude térmica (IPMA, 2021).

Do ponto de vista geomorfológico, a área apresenta uma configuração diversificada, marcada pela presença de vales encaixados nos principais cursos de água e por depósitos aluviais nas zonas mais baixas e próximas da faixa costeira. A litologia e os solos são igualmente heterogéneos, combinando formações graníticas nas encostas com solos aluviais mais férteis nos vales, condições que favorecem quer a agricultura intensiva, quer a implementação de sistemas de regadio nas áreas com maior disponibilidade hídrica (DGADR, 2020).

As explorações agrícolas da região apresentam, em média, uma Superfície Agrícola Utilizada (SAU) próxima dos 10 ha por unidade produtiva, sendo uma parte significativa dessa área irrigada. O encabeçamento bovino é elevado, ultrapassando, em média, as cinco unidades por hectare, o que reflete a intensidade produtiva historicamente associada a esta região (Brito et al., 2011).

Em termos fundiários, a bacia caracteriza-se por uma estrutura fundiária fragmentada, marcada pelo domínio do minifúndio e pela dispersão parcelar. Esta configuração limita a mecanização, aumenta os custos de produção e condiciona a expansão das áreas destinadas a culturas forrageiras (Delgado & Marques, 2012).

Paralelamente, a região tem sido sujeita a forte pressão urbanística, sobretudo nos concelhos mais próximos da Área Metropolitana do Porto. A expansão urbana tem promovido a conversão de solos agrícolas em áreas residenciais, industriais e infraestruturais, intensificando a fragmentação da paisagem agrária. Parte destas transformações ocorre em terrenos classificados como Reserva Agrícola Nacional (RAN), comprometendo a preservação da aptidão agrícola dos solos e agravando a vulnerabilidade das explorações de menor dimensão (Filipe et al., 2023).

No plano socioeconómico, o setor leiteiro continua a desempenhar um papel estruturante na economia regional, constituindo uma importante fonte de rendimento agrícola e mobilizando quer mão de obra familiar, quer trabalhadores especializados. Os resultados do Inquérito à Estrutura das Explorações Agrícolas de 2023, divulgados pelo INE, evidenciam um reforço da profissionalização do setor, traduzido pelo aumento da representatividade das sociedades agrícolas e pela consolidação da dimensão económica média das explorações. O mesmo inquérito assinala ainda uma redução dos efetivos de herbívoros e um aumento da área ocupada por culturas permanentes e pastagens, sugerindo processos de adaptação das explorações às limitações do sistema fundiário e às dinâmicas estruturais do território (INE, 2024).

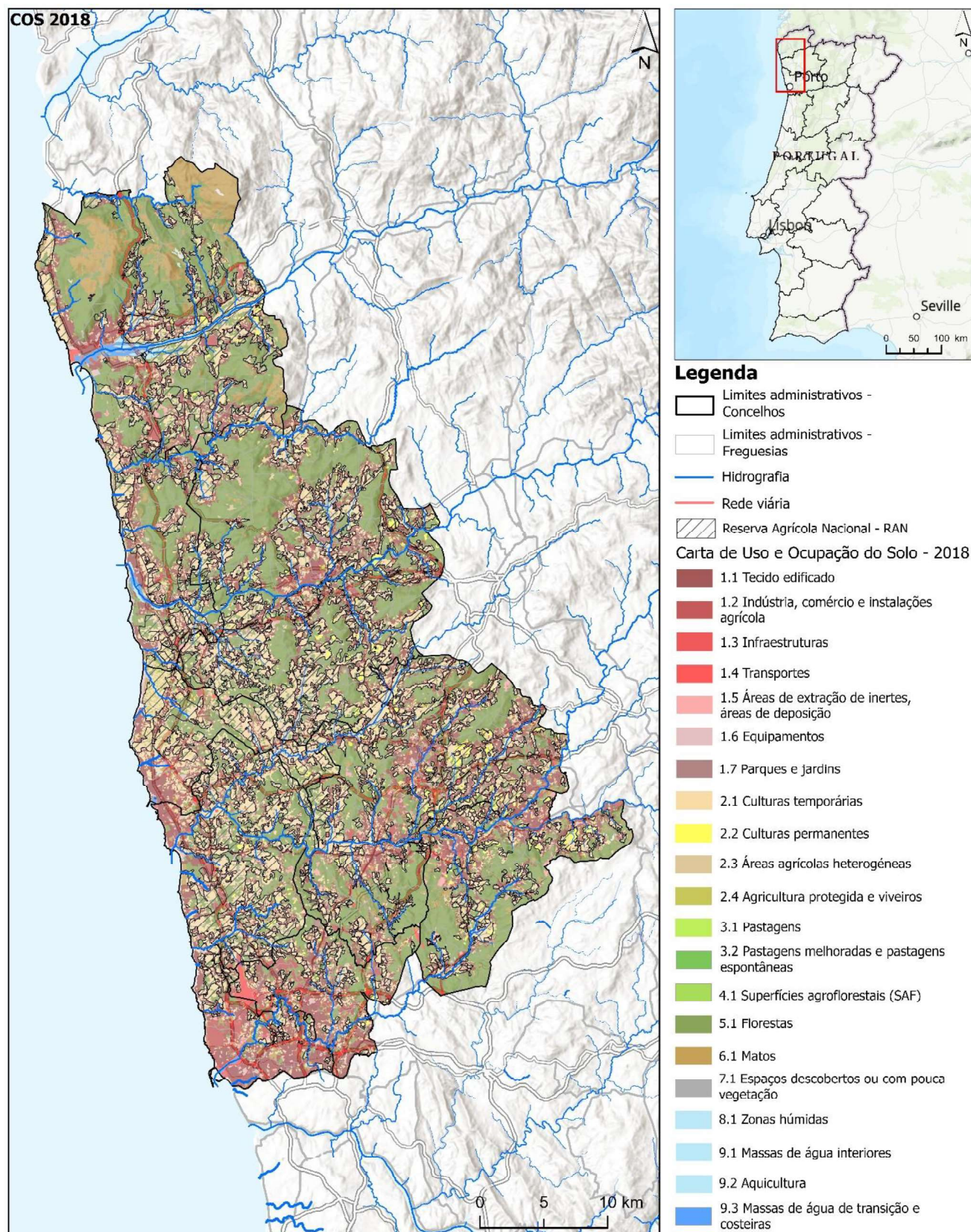


Figura 3.1. Enquadramento da área de estudo e respetiva carta de uso e ocupação do solo (COS 2018).

3.2. Estrutura e fluxo metodológico do estudo

A metodologia adotada foi organizada em três fases principais, sequenciais e interligadas, de modo a integrar informação biofísica, espacial e produtiva numa abordagem coerente de análise territorial.

Numa primeira fase, procedeu-se à identificação e ao mapeamento das áreas ocupadas com milho, recorrendo a técnicas de deteção remota e classificação supervisionada.

Numa segunda fase, desenvolveu-se uma modelação espacial da aptidão agroecológica, integrando variáveis climáticas, fisiográficas e pedológicas relevantes para diferentes ciclos FAO da cultura do milho.

Por fim, numa terceira fase, aplicou-se um modelo de otimização espacial, designadamente o Multi-Objective Land Allocation (MOLA), com o objetivo de resolver conflitos de adequação e propor uma distribuição territorial otimizada dos diferentes ciclos FAO. Na figura 3.2, encontra-se o fluxograma que retrata as diferentes fases de elaboração do estudo.

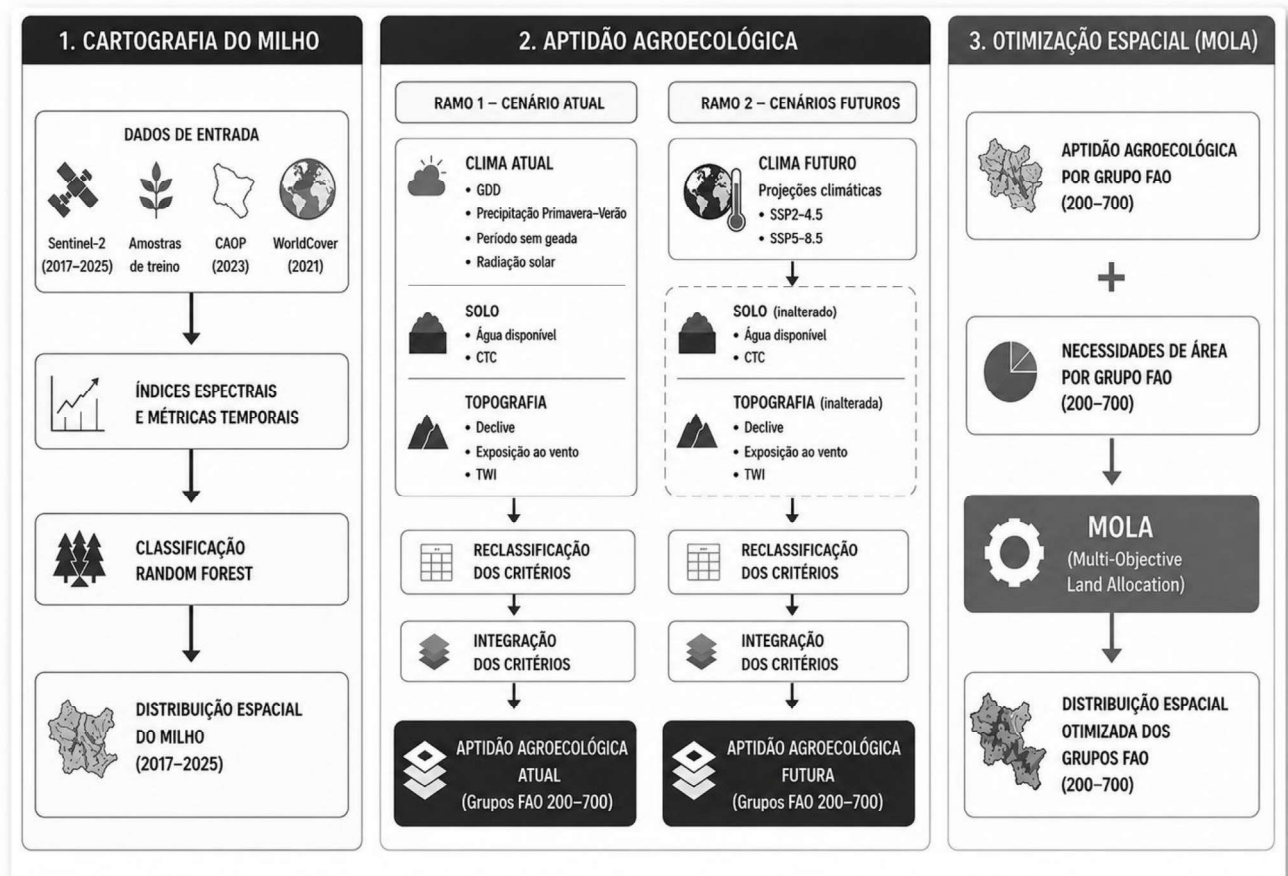


Figura 3.2. Fluxograma da metodologia adotada para o mapeamento das áreas de milho, modelação da aptidão agroecológica e otimização espacial dos grupos de maturação FAO na bacia leiteira primária do Entre Douro e Minho.

3.3. Identificação e mapeamento espacial das áreas de milho por detecção remota

A primeira fase do trabalho consistiu na identificação e no mapeamento das áreas de milho na região de estudo, recorrendo a dados multiespectrais Sentinel-2 e ao parcelário agrícola do iSIP. O procedimento metodológico envolveu duas etapas principais: (i) a seleção e rotulagem das parcelas com milho e sem milho, destinadas à construção do conjunto de áreas de treino; e (ii) o processamento e a classificação das imagens em ambiente Google Earth Engine (GEE).

O parcelário agrícola iSIP foi exportado para o ArcGIS Pro, onde as parcelas foram classificadas em duas classes binárias (milho / não milho), com base no ano de referência de 2025. A partir destas parcelas foram gerados aproximadamente 57 000 pontos amostrais com rótulo associado, posteriormente utilizados na construção do modelo de classificação. O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em subconjuntos independentes de treino e validação, de modo a assegurar uma avaliação interna do desempenho do modelo no ano base.

O processamento das imagens Sentinel-2 foi realizado no GEE, utilizando produtos Level-2A (*Surface Reflectance*). As imagens foram previamente filtradas quanto à presença de nuvens e sombras, com recurso à banda SCL (*Scene Classification Layer*). No conjunto, foram consideradas bandas com resolução espacial de 10 m e 20 m, harmonizadas para análise conjunta.

Adicionalmente, foi aplicada uma máscara prévia de ocupação agrícola com base no produto ESA WorldCover 2021, restringindo a classificação às áreas previamente identificadas como *cropland*. Esta abordagem permitiu reduzir a variabilidade espectral associada a classes não agrícolas, como áreas urbanas, florestais ou corpos de água, aumentando a coerência do modelo e reduzindo potenciais erros de classificação.

Foi calculado um conjunto de índices de vegetação amplamente utilizados na distinção de culturas agrícolas, nomeadamente: NDVI, EVI, NDWI, GNDVI, NDRE1, NDRE2, RDVI, SAVI, VDVI, PSRI, SIPI e MSI (Gallardo-Romero et al., 2023).

Para além dos índices instantâneos, foram derivadas métricas fenológicas com base em séries temporais do NDVI entre junho e setembro, período correspondente ao estágio de maior desenvolvimento vegetativo do milho na região. As métricas consideradas incluíram o valor máximo e mínimo do NDVI, a amplitude sazonal e o desvio-padrão, permitindo caracterizar a dinâmica intra-anual da vegetação.

Adicionalmente, foi calculado o índice PSRI no final do verão (agosto-setembro), de forma a captar alterações associadas à fase de maturação e início da senescência. A incorporação de métricas temporais tem demonstrado melhorar significativamente a capacidade discriminativa de modelos supervisionados em contexto agrícola (Bhatti et al., 2024).

O algoritmo *Random Forest* foi selecionado pela sua robustez na análise de múltiplas variáveis espectrais e pela sua capacidade de captar padrões complexos nos dados, apresentando um desempenho consistente em aplicações de detecção remota agrícola. Este modelo tem demonstrado elevada eficácia em classificações com imagens Sentinel-2, uma vez que combina múltiplas árvores de decisão, reduz o risco de sobreajustamento e melhora a estabilidade das previsões (Belgiu & Dragut, 2016).

O modelo foi treinado com os dados do ano base e avaliado com o subconjunto independente de validação, tendo sido obtida uma precisão global, na soma do processamento por cada concelho, superior a 95 %. Após validação, o modelo treinado foi aplicado aos restantes anos da série temporal, permitindo estimar a dinâmica espacial e temporal das áreas de milho ao longo do período de estudo.

As imagens Sentinel-2, originalmente disponibilizadas com resolução espacial de 10 m, foram processadas no Google Earth Engine e posteriormente exportadas com resolução de 30 m, opção metodológica adotada com o objetivo de reduzir a exigência computacional associada ao processamento e armazenamento dos dados.

Os mapas classificados e as estimativas anuais de área foram exportados em formato *raster* (GeoTIFF) e tabular (CSV), sendo posteriormente integrados e analisados em ambiente ArcGIS Pro para produção cartográfica e no Microsoft Excel para análise estatística e representação gráfica da evolução temporal.

3.4. Avaliação e modelação da aptidão agroecológica do milho

A zonagem agroecológica foi desenvolvida com o objetivo de estimar a adequação territorial da região de estudo para diferentes ciclos de cultivo do milho (ciclos FAO 200 a 700), integrando variáveis biofísicas de natureza climática, fisiográfica e pedológica. A adequação territorial foi determinada pela combinação de fatores que condicionam o estabelecimento, o crescimento e o desenvolvimento da cultura, nomeadamente condições térmicas, hídricas, topográficas e edáficas.

No conjunto foram selecionadas as variáveis biofísicas consideradas mais relevantes para a cultura do milho: precipitação acumulada no período de crescimento, graus-dia acima de 10 °C acumulados, período livre de geadas e radiação solar (variáveis climáticas); altitude, declive, orientação de vertentes, radiação potencial e índice topográfico de humidade (TWI) (variáveis fisiográficas); e atributos do solo, como textura, capacidade de troca catiónica (CTC) e água disponível no perfil (variáveis pedológicas).

3.4.1. Variáveis climáticas

As variáveis climáticas de referência foram obtidas a partir das normais climatológicas do WorldClim, considerando o período de 1991-2020, com resolução espacial aproximada de 1 km², adequada a análises de zonagem agrícola. Estas variáveis caracterizam o regime térmico e hídrico da região e são fundamentais para descrever as condições de desenvolvimento do milho.

A precipitação acumulada entre março e setembro foi selecionada por corresponder ao principal período de crescimento da cultura na região. As temperaturas médias mensais foram utilizadas para o cálculo dos graus-dia, indicador amplamente empregue para estimar a duração do ciclo e distinguir os requisitos térmicos das diferentes classes FAO.

Os graus-dia de crescimento (*Growing Degree Days* – GDD) constituem um dos principais indicadores utilizados para estimar a duração das diferentes fases fenológicas das culturas e apoiar a definição dos requisitos térmicos associados aos diferentes ciclos culturais (Paredes et al., 2025).

Diversos estudos demonstram que a acumulação térmica está diretamente associada ao desenvolvimento fenológico e ao rendimento do milho em diferentes ambientes (Parent et al., 2019). Em condições mediterrânicas, estudos realizados para Portugal demonstram igualmente que as alterações climáticas poderão influenciar significativamente o rendimento do milho, a duração do ciclo cultural e as necessidades de rega, sobretudo em cenários de aumento da temperatura e redução da disponibilidade hídrica (Yang et al., 2017).

Foram igualmente incluídas variáveis relacionadas com o risco de geada, uma vez que episódios de

frio na primavera podem comprometer a emergência ou destruir a cultura. O período livre de geadas constitui, por isso, um critério relevante em avaliações de recomendação de ciclo FAO e no planeamento agrícola (Tollenaar & Lee, 2011).

A radiação solar média, igualmente extraída do WorldClim, foi incluída por influenciar diretamente a fotossíntese e a produção de biomassa, sobretudo durante a fase reprodutiva.

Com base no enquadramento apresentado na revisão da literatura, foram considerados cenários climáticos futuros derivados do conjunto de modelos CMIP6. Para o efeito, utilizaram-se os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, obtidos a partir da base de dados CHELSA v2.1. As projeções climáticas foram analisadas para dois períodos futuros, 2041-2070 e 2071-2100, permitindo avaliar a evolução potencial das condições climáticas relevantes para o desenvolvimento da cultura do milho. As variáveis climáticas obtidas para cada cenário foram posteriormente reclassificadas de acordo com os critérios definidos para os diferentes ciclos FAO e integradas na análise multicritério de aptidão agroecológica.

3.4.2. Variáveis fisiográficas

Os dados fisiográficos foram obtidos a partir do modelo digital de elevação SRTM, com resolução aproximada de 25 m. A partir deste modelo calcularam-se as variáveis como a altitude, declive, orientação de vertentes, radiação potencial e índice de humidade topográfica (TWI), recorrendo ao software ArcGIS Pro.

Estas variáveis são frequentemente utilizadas em estudos de aptidão agrícola, uma vez que influenciam aspetos fundamentais como a temperatura local, a radiação solar recebida e a forma como a água escoia à superfície. O TWI procura representar zonas com maior propensão à acumulação de água no solo, relacionando a forma do relevo com o padrão de escoamento. Este índice é particularmente útil em culturas sensíveis às variações de humidade no perfil do solo, como é o caso do milho. A FAO salienta, nos seus manuais técnicos, que estes fatores devem ser considerados na avaliação das condições físicas de um território para fins agrícolas (FAO, 2007).

3.4.3. Variáveis pedológicas

A informação pedológica foi obtida a partir do repositório European Soil Data Centre (ESDAC), que disponibiliza dados harmonizados para a Europa. Foram considerados atributos representativos do perfil até 30 cm de profundidade.

Entre os atributos selecionados destacam-se a textura, a capacidade de troca catiónica (CTC) e a água disponível no solo. Estas variáveis são amplamente reconhecidas como essenciais na caracterização da fertilidade e do comportamento hídrico do solo. De forma geral, solos com boa estrutura, maior CTC e níveis adequados de água disponível tendem a oferecer melhores condições para o desenvolvimento radicular e para a utilização eficiente dos nutrientes pelas plantas (FAO, 2015; Hengl et al., 2017).

3.4.4. Reclassificação e integração multicritério para cartografia de aptidão de ciclos FAO

Para cada variável biofísica foram definidos limiares de adequação específicos para cada ciclo FAO, de acordo com os respetivos requisitos térmicos, hídricos e edafoclimáticos. As variáveis foram reclassificadas numa escala ordinal de 1 a 5, em que os valores mais elevados correspondem a maior adequação biofísica às exigências do ciclo considerado.

Em ambiente SIG, as camadas *raster* correspondem a estruturas matriciais compostas por píxeis, em que cada célula armazena um valor associado a determinada variável biofísica ou ambiental (Longley et al., 2021). Para assegurar a compatibilidade entre as diferentes fontes de informação utilizadas na análise multicritério, todas as camadas *raster* foram harmonizadas para uma resolução espacial comum. Posteriormente, em ambiente ArcGIS Pro, as diferentes variáveis biofísicas foram ajustadas para uma resolução espacial comum de 100×100 m, permitindo a integração coerente das variáveis climáticas, fisiográficas e pedológicas na modelação da aptidão agroecológica.

Após esta etapa, as variáveis reclassificadas foram normalizadas para a mesma escala e combinadas através de álgebra de mapas, produzindo uma avaliação específica de aptidão para cada ciclo FAO. Os critérios de reclassificação utilizados para os fatores climáticos, pedológicos e topográfico (Quadro 3.1, 3.2 e 3.3). Estes critérios baseiam-se em referências clássicas e contemporâneas de avaliação agroecológica e ecofisiologia do milho, devendo ser posteriormente complementados com a listagem final das referências específicas associadas aos ciclos FAO.

Este procedimento resultou na geração de mapas finais de aptidão biofísica classificados em cinco

níveis — muito baixo, baixo, moderado, bom e excelente — para o período climatológico de referência e para os cenários climáticos projetados, refletindo as exigências térmicas, hídricas e edáficas de cada ciclo FAO.

Quadro 3.1. Critérios de reclassificação dos fatores climáticos considerados no estudo

Fator	Ciclo FAO*	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Graus-dia de crescimento (GDD)	200	588–1000	1000–1050	1050–1100	1100–1150	1150–2241
	300	588–1150	1150–1200	1200–1250	1250–1300	1300–2241
	400	588–1300	1300–1350	1350–1400	1400–1450	1450–2241
	500	588–1450	1450–1500	1500–1550	1550–1600	1600–2241
	600	588–1600	1600–1650	1650–1700	1700–1750	1750–2241
	700	588–1750	1750–1800	1800–1850	1850–1900	1900–2241
Período livre de geada (FFP)	200	186–190	190–200	200–205	205–210	210–362
	300	186–200	200–210	210–220	220–230	230–362
	400	186–220	220–230	230–240	240–250	250–362
	500	186–240	240–255	255–270	270–280	280–362
	600	186–270	270–285	285–300	300–310	310–362
	700	186–300	300–315	315–330	330–350	350–362
Precipitação no período de crescimento	200	361–380	380–400	400–420	420–450	450–698
	300	361–400	400–430	430–460	460–500	500–698
	400	361–450	450–490	490–530	530–550	550–698
	500	361–480	480–510	510–550	550–590	590–698
	600	361–520	520–560	560–600	600–640	640–698
	700	361–550	550–600	600–650	650–680	680–698

Nota: Os intervalos apresentados para os fatores climáticos baseiam-se em critérios ecofisiológicos descritos para a cultura do milho em FAO (1976; 1996), Sys et al. (1993), Neild & Newman (1990) e Allen et al. (1998).

***Nota:** O ciclo FAO do milho é um índice relativo de maturação, utilizado para classificar híbridos segundo a duração do seu desenvolvimento, funcionalmente associada às necessidades térmicas acumuladas até à maturidade fisiológica. Em condições mediterrânicas, híbridos pertencentes a grupos FAO mais elevados (FAO 500–600) apresentam ciclos da ordem de 130 dias, enquanto grupos FAO inferiores correspondem a ciclos progressivamente mais curtos (Djalovic et al., 2024; Zdunić et al., 2022).

Quadro 3.2. Critérios de reclassificação dos fatores do solo considerados no estudo

Fator	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Capacidade de água disponível (AWC)	0.057–0.070	0.070–0.075	0.075–0.085	0.085–0.095	0.095–0.114
Capacidade de troca catiónica (CEC)	2.12–4	4–6	6–8	8–11	11–16.84

Nota: Os critérios de reclassificação dos atributos do solo baseiam-se em métodos de avaliação da aptidão agrícola descritos em Sys et al. (1993), FAO (2015) e Hengl et al. (2017).

Quadro 3.3. Critérios de reclassificação dos fatores topográficos considerados no estudo

Fator	Ciclo FAO	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Declive (%)	—	0–0.1	0.1–2	2–5	5–8	8–12
Radiação	200	213735–	650000–	700000–	800000–	850000–
		650000	700000	800000	850000	1206467
	300	213735–	700000–	750000–	825000–	875000–
		700000	750000	825000	875000	1206467
	400	213735–	750000–	800000–	850000–	900000–
		750000	800000	850000	900000	1206467
	500	213735–	800000–	850000–	900000–	950000–
		800000	850000	900000	950000	1206467
	600	213735–	850000–	900000–	950000–	1000000–
		850000	900000	950000	1000000	1206467
	700	213735–	900000–	950000–	1000000–	1050000–
		900000	950000	1000000	1050000	1206467
Exposição ao vento	200	0.763–1.00	1.00–1.05	1.05–1.10	1.10–1.15	1.15–1.32
	300	0.763–0.95	0.95–1.00	1.00–1.05	1.05–1.10	1.10–1.32

	400	0.763–0.90	0.90–0.95	0.95–1.00	1.00–1.05	1.05–1.32
	500	0.763–0.85	0.85–0.90	0.90–0.95	0.95–1.00	1.00–1.32
	600	0.763–0.80	0.80–0.85	0.85–0.90	0.90–0.95	0.95–1.32
	700	≤0.763	0.763–0.80	0.80–0.85	0.85–0.90	0.90–1.32
Índice de humidade topográfica (TWI)	200	3.49–8	8–10	10–11	11–12	12–20.89
	300	3.49–9.5	9.5–10	10–11	11–12	12–20.89
	400	3.49–9	9–9.5	9.5–10	10–11	11–20.89
	500	3.49–8.5	8.5–9	9–9.5	9.5–10	10–20.89
	600	3.49–8	8–8.25	8.25–8.5	8.5–9	9–20.89
	700	3.49–7	7–7.25	7.25–7.5	7.5–8	8–20.89

Os critérios aplicados aos fatores topográficos baseiam-se em abordagens de avaliação agroecológica e análise espacial descritas em FAO (2007) e Moore et al. (1991).

3.5. Otimização espacial através do Modelo *Multi-Objective Land Allocation* (MOLA)

Após a obtenção dos mapas individuais de aptidão biofísica para cada ciclo FAO, procedeu-se à aplicação do modelo *Multi-Objective Land Allocation* (MOLA), com o objetivo de converter a adequação potencial múltipla numa solução espacial única e coerente para cada parcela. A modelação agroecológica anterior permitia que a mesma unidade territorial apresentasse aptidão simultânea para mais do que um ciclo de maturação, originando situações de sobreposição e ambiguidade na atribuição espacial dos ciclos FAO. O Modelo de Alocação Espacial (MOLA – *Multi-Objective Land Allocation*) é uma abordagem utilizada em Sistemas de Informação Geográfica para distribuir espacialmente usos do solo, infraestruturas ou equipamentos de forma otimizada, considerando simultaneamente múltiplos objetivos, restrições e critérios de adequabilidade.

O modelo foi implementado em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), recorrendo à ferramenta MOLA disponível no ArcGIS Pro, sendo utilizado como procedimento de alocação espacial multicritério para impor uma atribuição mutuamente exclusiva entre classes concorrentes e resolver conflitos de adequação através de regras hierarquizadas de decisão.

Na fase de otimização espacial, realizada através do modelo (MOLA), foram utilizados píxeis com dimensão de 25 × 25 m, correspondendo a uma área de 625 m² por célula. Esta resolução permitiu uma

representação espacial mais detalhada da distribuição potencial dos diferentes grupos FAO, assegurando maior precisão na etapa de alocação espacial dos usos considerados.

No presente estudo, a lógica de alocação foi orientada para sistemas de produção de milho para silagem, nos quais a maximização da produção de biomassa constitui o principal objetivo agronômico. Assim, assumiu-se explicitamente que, sempre que as condições térmicas, hídricas e edáficas o permitissem, ciclos de maturação mais longos apresentam maior potencial produtivo do que ciclos mais curtos. Com base neste princípio, foi estabelecida uma hierarquia de priorização progressiva dos grupos FAO, atribuindo precedência aos ciclos de maior duração nas áreas classificadas como adequadas e restringindo a seleção a ciclos mais curtos apenas quando limitações biofísicas inviabilizavam o desenvolvimento de ciclos superiores. A alocação final resultou, portanto, de um processo de otimização condicionado pela aptidão biofísica previamente modelada, assegurando que cada célula territorial recebe apenas um ciclo de maturação, correspondente à opção agronomicamente mais favorável no contexto de produção de silagem.

Este procedimento foi aplicado ao cenário climático de referência e replicado para os cenários projetados SSP2-4.5 e SSP5-8.5, nos horizontes temporais de 2041-2070 e 2071-2100, permitindo avaliar de que forma as alterações climáticas influenciam não apenas a aptidão potencial, mas também a configuração espacial ótima dos diferentes grupos de maturação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Distribuição espacial e evolução temporal da área de milho (2017–2025)

Nesta secção apresentam-se os resultados da estimativa da área ocupada pela cultura do milho, obtida por detecção remota, para o período 2017–2025. A análise incide sobre a sua distribuição espacial, a evolução temporal da área estimada e a comparação com os valores declarados no âmbito do Pedido Único (PU).

A secção organiza-se em três momentos complementares: (i) análise da distribuição espacial da cultura ao longo do período em estudo; (ii) evolução temporal da área estimada por detecção remota e da área declarada no PU; e (iii) quantificação e interpretação das diferenças observadas entre ambas as fontes de informação.

4.1.1. Distribuição espacial da cultura do milho (2017-2025)

A distribuição espacial da cultura do milho na área de estudo, estimada por detecção remota e classificação de imagens, evidencia uma configuração territorial relativamente estável ao longo do período 2017–2025. A Figura 4.1 apresenta, numa mesma composição gráfica, a ocupação identificada em 2017 e em 2025, permitindo comparar diretamente o início e o final do período analisado.

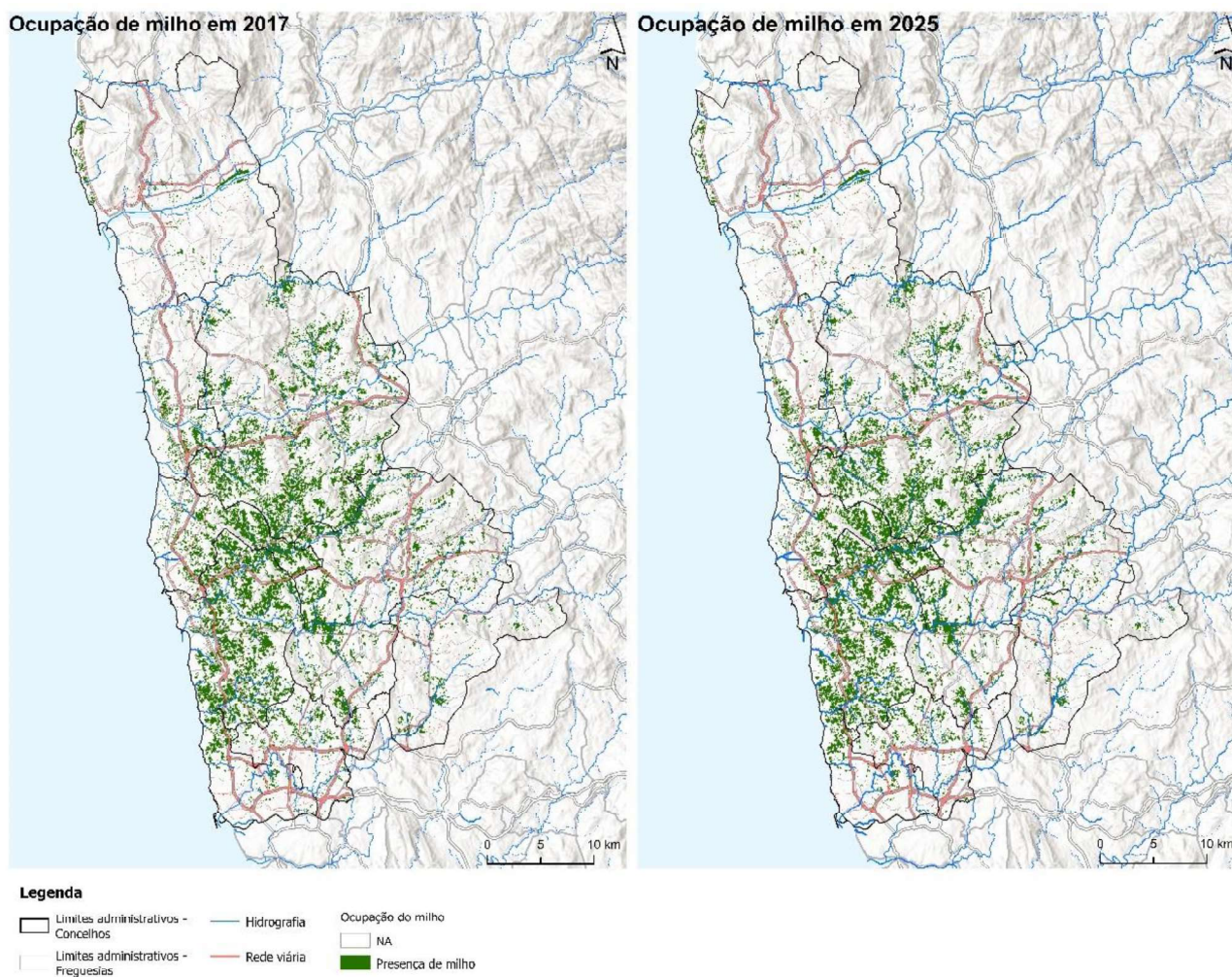


Figura 4.1. Distribuição espacial da cultura do milho na área de estudo, estimada por deteção remota, nos anos de 2017 (esquerda) e 2025 (direita).

A observação da Figura 4.1 mostra que, em 2017, a cultura do milho se concentrava sobretudo nos concelhos de Barcelos, Vila do Conde, Vila Nova de Famalicão e Póvoa de Varzim, onde se verifica maior continuidade espacial das parcelas classificadas. Nas zonas mais periféricas e interiores, a ocupação apresenta um padrão mais fragmentado e disperso. A comparação com 2025 indica que a configuração espacial global da cultura, quando observada à escala regional, se mantém semelhante, preservando-se as principais áreas de concentração. Ainda assim, observam-se variações locais na extensão e na continuidade de algumas manchas agrícolas, traduzindo ajustamentos espaciais pontuais ao longo do período considerado.

A análise dos mapas anuais completos (Anexo I) confirma que, entre 2017 e 2025, a implantação territorial da cultura do milho permaneceu estruturalmente estável nas principais zonas agrícolas da

região, não se verificando alterações expressivas na localização das áreas de maior concentração.

A Figura 4.2, correspondente ao mapa de frequência da ocupação da cultura no período 2017–2025, permite identificar as áreas de maior persistência temporal. As parcelas com classes de frequência mais elevadas concentram-se predominantemente na parte central da área de estudo, o que indica continuidade da utilização destas superfícies para a cultura do milho ao longo dos anos. Em contraste, as classes de menor frequência apresentam uma distribuição mais dispersa e fragmentada, correspondendo a áreas onde a presença da cultura foi intermitente.

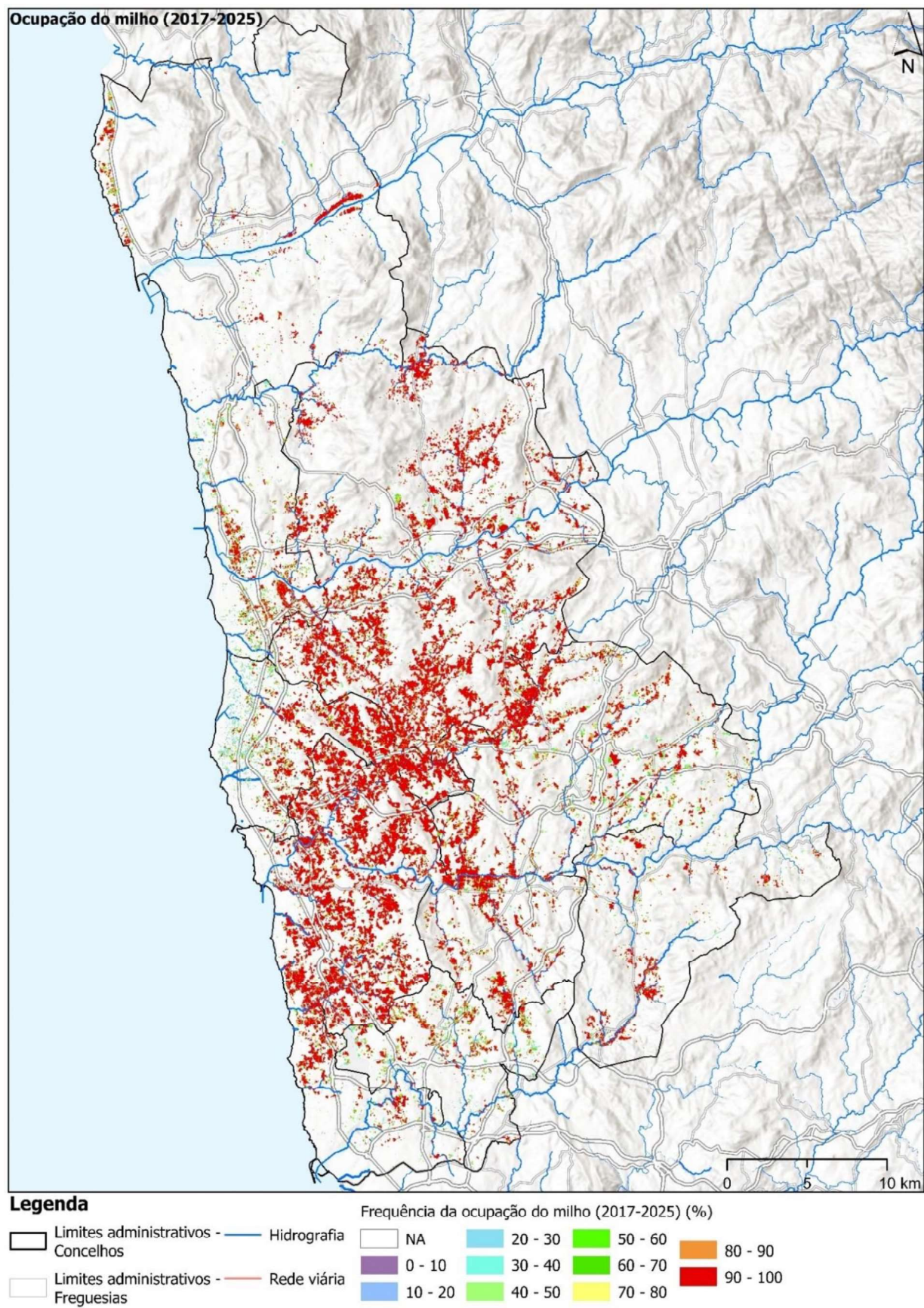


Figura 4.2. Frequência da ocupação do milho (2017–2025)

Em termos interpretativos, estes resultados sugerem a existência de um núcleo territorial de especialização produtiva, no qual a cultura do milho assume caráter recorrente e estrutural, coexistindo com áreas periféricas de maior variabilidade de uso. Esta diferenciação espacial revela que a ocupação do solo pela cultura não é homogênea em toda a bacia leiteira, refletindo diferenças locais de aptidão, estrutura fundiária, bem como opções e organização dos sistemas produtivos.

4.1.2. Evolução temporal da área de milho (deteção remota e Pedido único (PU))

A evolução temporal da área ocupada pela cultura do milho, estimada por deteção remota e declarada no âmbito do Pedido Único (Figura 4.3). A análise conjunta das duas séries temporais permite comparar a dinâmica observada diretamente a partir da ocupação do solo com a informação administrativa reportada pelos produtores.

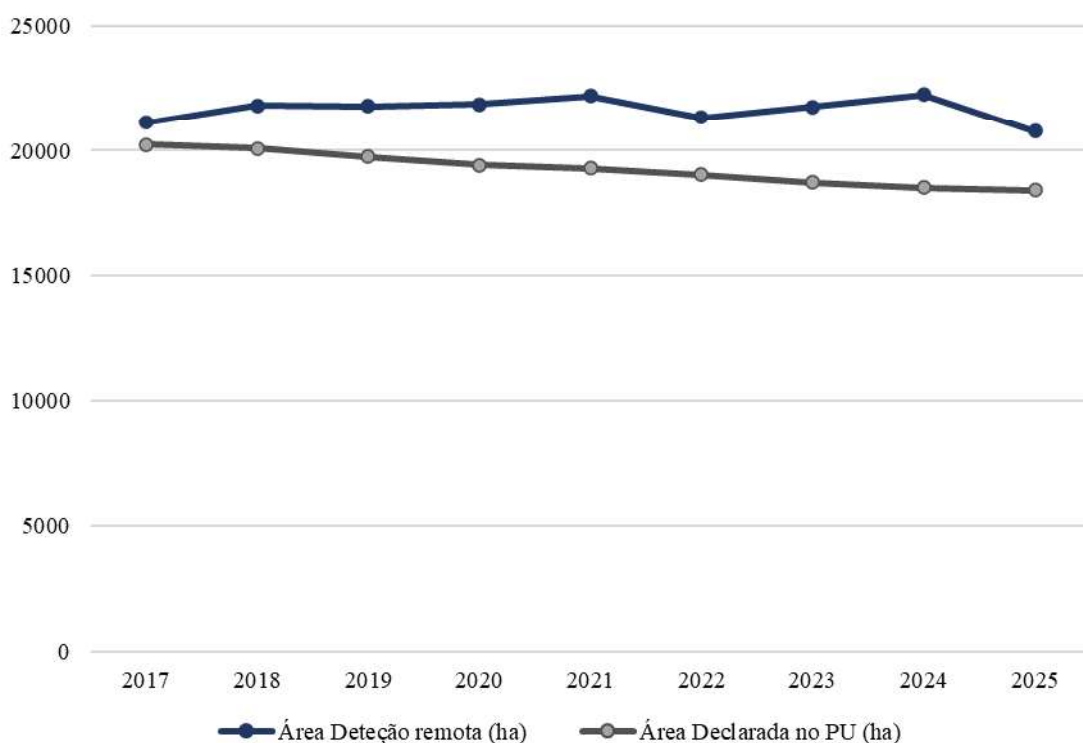


Figura 4.3. Evolução anual da área total de milho estimada por deteção remota e declarada no Pedido Único (2017–2025)

Os valores estimados por deteção remota apresentam uma variação interanual relativamente moderada, situando-se entre aproximadamente 21 138 ha, em 2017, e 22 224 ha, em 2024 (Anexo IV). Esta

amplitude reduzida sugere estabilidade global da superfície efetivamente ocupada pela cultura ao longo do período analisado.

Por sua vez, os valores declarados no PU apresentam uma trajetória globalmente decrescente. A comparação visual das duas séries temporais evidencia que, em todos os anos considerados, a área estimada por detecção remota é superior à área declarada no PU, o que revela a existência de um desfasamento sistemático entre a ocupação observada e a área formalmente registrada. A diferença anual entre as duas fontes de informação encontra-se representada na Figura 4.4.

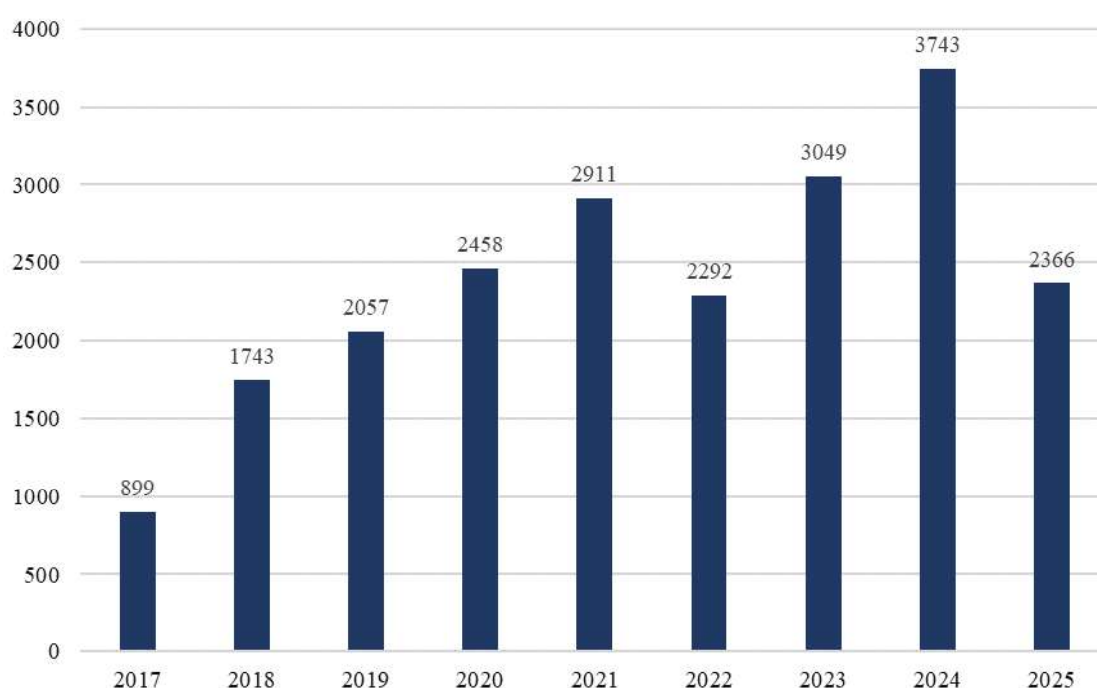


Figura 4.4. Diferença anual entre a área estimada por detecção remota e a área declarada no Pedido Único (2017-2025)

No conjunto, observa-se que a discrepância entre ambas as fontes aumentam ao longo do período em análise. A diferença varia entre cerca de 899 ha, em 2017, e 3 743 ha, em 2024, registrando-se uma ligeira redução em 2025. Esta tendência sugere que, ao longo do tempo, as duas séries passaram a divergir de forma mais acentuada, reforçando a necessidade de discutir as causas subjacentes a este afastamento.

4.1.3. Comparação entre área estimada por deteção remota e área declarada no Pedido Único

A análise da área ocupada pela cultura do milho à escala concelhia evidencia diferenças territoriais de distribuição e evolução entre os municípios da área de estudo, tanto na estimativa obtida por deteção remota como nos valores declarados no PU.

A evolução anual da área estimada por deteção remota, por concelho, é apresentada no Anexo II, verificando-se que os concelhos de Barcelos, Vila do Conde, Vila Nova de Famalicão e Póvoa de Varzim concentram, de forma consistente, as maiores superfícies cultivadas. De forma semelhante, a evolução anual da área declarada no PU por concelho (Anexo III) evidencia maior expressão territorial nestes mesmos municípios, embora com tendência de redução mais marcada em vários casos. A diferença acumulada entre a área estimada por deteção remota e a área declarada no PU, para o período 2017–2025 (Figura 4.5) representa estas diferenças de dimensão.

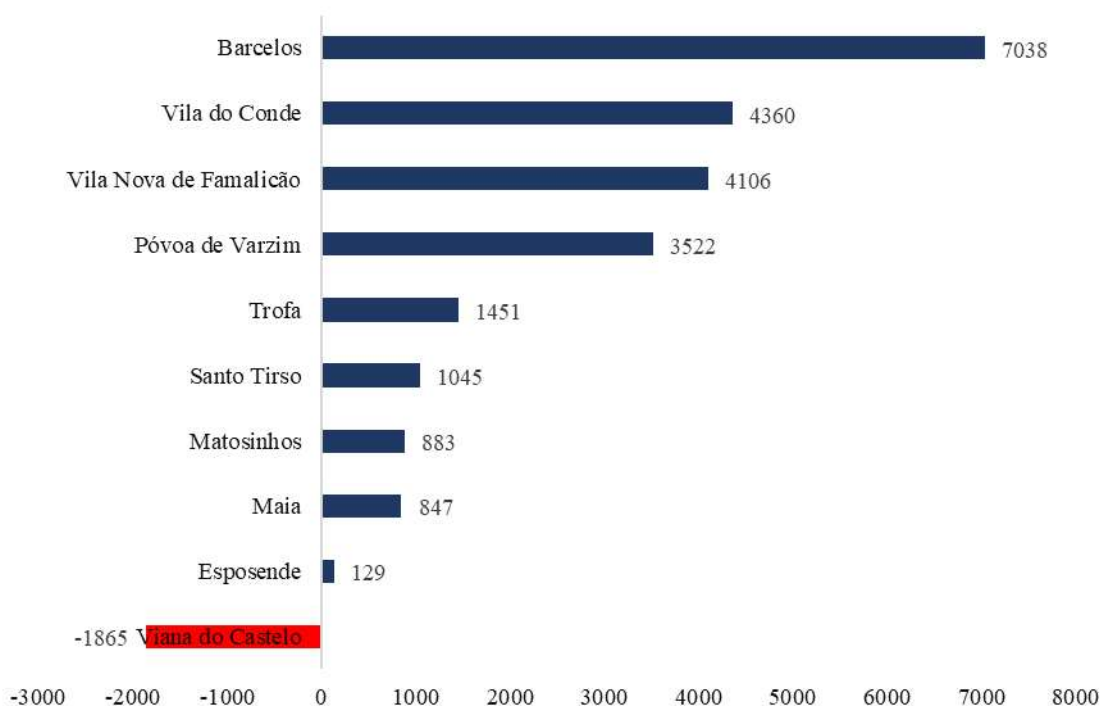


Figura 4.5. Diferença acumulada (2017–2025) entre a área estimada por deteção remota e a área declarada no Pedido Único, por concelho.

No conjunto verifica-se que os valores acumulados mais elevados ocorrem nos concelhos de Barcelos, Vila do Conde, Vila Nova de Famalicão e Póvoa de Varzim, enquanto o concelho de Viana do Castelo apresenta expressão comparativamente mais reduzida. Este padrão confirma que as divergências entre as duas fontes não se distribuem de forma uniforme no território, sendo mais expressivas nas áreas

onde a cultura do milho apresenta maior relevância espacial e produtiva.

A relação entre a área total anual estimada por detecção remota e a área total anual declarada no PU é apresentada na Figura 4.6.

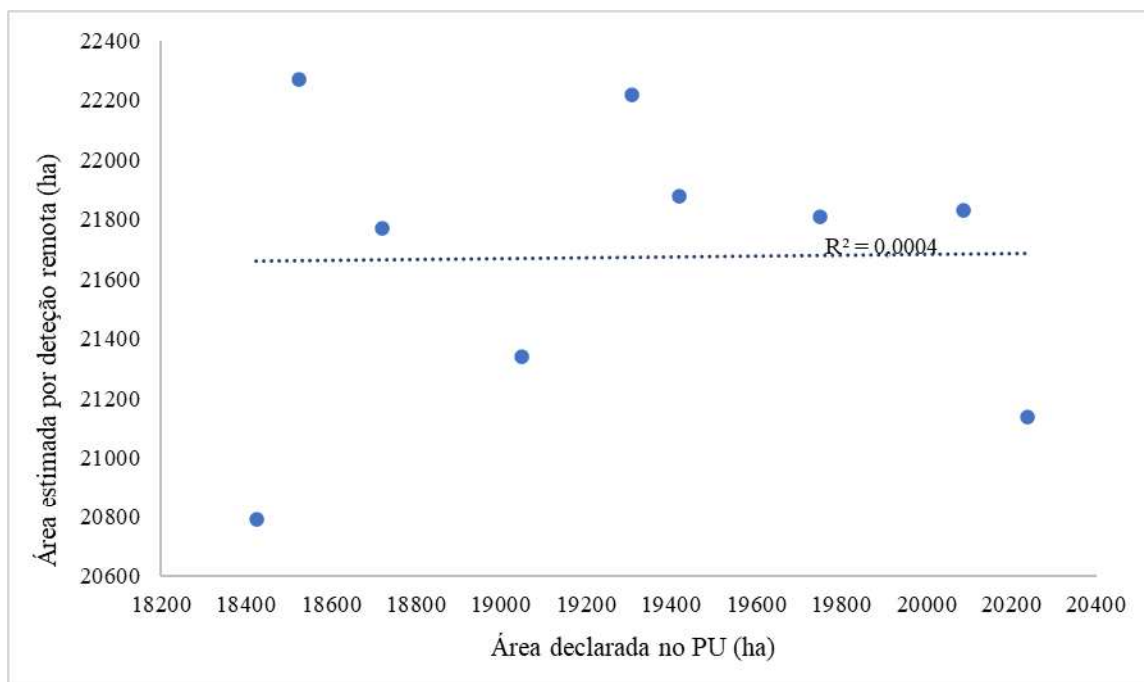


Figura 4.6. Relação entre a área total anual estimada por detecção remota e a área declarada no Pedido Único (2017–2025).

A representação gráfica da relação entre as duas séries temporais evidencia considerável dispersão dos pontos e um coeficiente de determinação reduzido ($R^2 \approx 0,0004$), indicando ausência de relação linear significativa entre as variações anuais das duas fontes. Em termos analíticos, este resultado sugere que a evolução da área declarada não acompanha, de forma proporcional, a evolução da área efetivamente identificada por detecção remota.

De forma global, a análise concelhia confirma a existência de diferenças territoriais na distribuição da cultura do milho e evidencia discrepâncias quantitativas relevantes entre as duas fontes de informação. Estes resultados reforçam a importância de interpretar os dados administrativos e os dados de observação remota como fontes complementares, mas não necessariamente coincidentes.

4.2. Modelação da aptidão agroecológica em cenário atual e futuro

Enquanto a secção anterior incidiu sobre a distribuição efetiva da cultura do milho na área de estudo, o presente ponto analisa a sua aptidão agroecológica potencial, estimada a partir da integração de variáveis climáticas, fisiográficas e pedológicas para diferentes grupos de maturação FAO, no cenário climatológico de referência e em cenários climáticos futuros.

A distribuição espacial dos grupos FAO, definida com base nos graus-dia acumulados (Anexo V e Anexo VI), evidencia alterações progressivas na disponibilidade térmica da área de estudo entre o cenário climatológico de referência e os cenários climáticos futuros. No cenário de referência observa-se maior heterogeneidade espacial, caracterizada pela coexistência de diferentes grupos de maturação e pela presença significativa de ciclos curtos e intermédios.

Nos cenários futuros verifica-se uma expansão gradual dos grupos FAO de maior duração, acompanhada pela redução da expressão territorial dos ciclos mais curtos. Esta tendência torna-se particularmente expressiva nos períodos finais do século, sobretudo no cenário SSP5-8.5, no qual o grupo FAO 700 passa a ocupar grande parte da área de estudo. Este padrão reflete um aumento generalizado da disponibilidade térmica acumulada, indicando uma evolução das condições agroclimáticas favoráveis à cultura do milho e uma potencial reconfiguração da aptidão territorial para diferentes ciclos de maturação.

4.2.1. Cenário de referência (1981-2010)

No cenário climatológico de referência (Anexo XI), a modelação da aptidão agroecológica evidencia uma diferenciação territorial progressiva à medida que se consideram grupos FAO com ciclos de maturação mais longos. Esta diferenciação traduz-se em alterações na continuidade espacial, na extensão territorial e na distribuição das classes de aptidão associadas a cada grupo de maturação.

No grupo FAO 200, observa-se uma predominância generalizada das classes “Excelente” e “Bom” em grande parte da área de estudo, formando manchas contínuas e extensas (Figura A11.1). Este padrão reflete a elevada adequação territorial deste grupo, associada às suas menores exigências térmicas. No grupo FAO 300, mantém-se o domínio das classes de aptidão elevada, embora se verifique uma

ligeira expansão das classes intermédias, indiciando o aumento gradual das exigências agroclimáticas (Figura A11.2).

No grupo FAO 400, a distribuição espacial revela uma redução progressiva das áreas classificadas como “Excelente”, acompanhada por um aumento da classe “Moderado” (Figura A11.3). Este padrão evidencia uma alteração gradual da adequação territorial à medida que aumentam as necessidades térmicas da cultura. Esta tendência torna-se mais marcante no grupo FAO 500, cuja distribuição apresenta maior heterogeneidade espacial, maior fragmentação das áreas de elevada aptidão e uma presença mais expressiva das classes intermédias e baixas (Figura A11.4).

Nos grupos de maturação mais longos, esta tendência intensifica-se. O grupo FAO 600 apresenta maior representatividade das classes “Moderado” e “Baixo”, bem como uma diminuição da continuidade espacial das áreas mais aptas (Figura A11.5). No grupo FAO 700, a configuração territorial passa a ser dominada pelas classes “Baixo” e “Muito baixo”, que ocupam grande parte da área de estudo, enquanto as classes “Bom” e “Excelente” surgem de forma residual e fragmentada (Figura A11.6).

De forma global, o cenário de referência evidencia uma diminuição progressiva da aptidão agroecológica à medida que aumentam as exigências térmicas dos grupos FAO. Este resultado sugere que, nas condições climatológicas de 1981–2010, a área de estudo apresenta limitações relevantes para suportar, de forma generalizada, ciclos de maturação mais longos.

4.2.2. Cenário SSP2-4.5

No cenário SSP2-4.5, a modelação da aptidão agroecológica evidencia uma reorganização progressiva da configuração territorial das classes de aptidão. Embora se mantenha uma diferenciação clara entre grupos FAO, observa-se uma tendência de melhoria da adequação territorial para os ciclos de maturação mais longos, particularmente quando comparada com o cenário de referência (Anexo XII).

4.2.2.1. Período 2041–2070

No período 2041–2070, o grupo FAO 200 mantém uma predominância generalizada das classes de aptidão elevada, com elevada continuidade espacial (Figura A12.1). Este padrão é igualmente

observado no grupo FAO 300, no qual as classes “Bom” e “Excelente” continuam a ocupar grande parte da área de estudo, sendo reduzida a expressão territorial das classes de menor aptidão (Figura A12.2).

Nos grupos FAO 400 e FAO 500, verifica-se uma transição gradual na configuração espacial da aptidão. Esta transição caracteriza-se pela redução da representatividade da classe “Excelente” e pelo aumento das áreas classificadas como “Moderado”, resultando numa distribuição mais heterogénea e numa maior fragmentação das áreas de elevada aptidão (Figura A12.4 e Figura A12.5).

Nos ciclos de maturação mais longos, esta diferenciação torna-se mais evidente. O grupo FAO 600 apresenta uma presença significativa de classes intermédias e baixas, revelando ainda algumas limitações territoriais à sua expansão (Figura A12.5). No grupo FAO 700, observa-se um aumento da representatividade das classes “Moderado” e “Bom”, acompanhado por uma redução relativa das classes mais limitantes. Contudo, este grupo ainda não apresenta um predomínio generalizado de aptidão elevada no território (Figura A12.6).

4.2.2.2. Período 2071–2100

No período final do século, os grupos FAO 200 e FAO 300 mantêm uma elevada aptidão territorial, com ampla continuidade espacial das áreas classificadas como “Bom” e “Excelente”. Este padrão confirma a persistência de condições favoráveis aos ciclos de maturação mais curtos (Figura A 12.7 e Figura A12.8). Nos ciclos intermédios, designadamente FAO 400 e FAO 500 (Figura A12.9 e Figura A12.10), verifica-se uma melhoria da configuração territorial da aptidão, expressa pelo aumento da continuidade das áreas classificadas como “Bom” e pela redução da fragmentação anteriormente observada. Esta evolução sugere uma maior estabilidade espacial das condições favoráveis ao desenvolvimento destes grupos de maturação.

As alterações mais expressivas ocorrem, contudo, nos ciclos de maior duração. O grupo FAO 600 representado na Figura A12.11, apresenta uma expansão das áreas com aptidão intermédia e elevada, enquanto o grupo FAO 700 evidencia um aumento significativo das classes “Moderado” e “Bom”. Estas classes passam a formar áreas mais contínuas, ao mesmo tempo que se reduz a representatividade das classes mais limitantes (Figura A12.12).

Em síntese, o cenário SSP2-4.5 aponta para uma expansão progressiva da aptidão agroecológica para ciclos de maturação mais longos, embora se mantenha uma diferenciação territorial entre os diferentes grupos FAO. Esta evolução sugere uma alteração gradual das condições agroclimáticas da área de estudo, favorecendo, em particular, grupos de maior duração no final do século.

4.2.3. Cenário SSP5-8.5

No cenário SSP5-8.5, a modelação da aptidão agroecológica revela uma configuração territorial marcada por uma elevada representatividade das classes de aptidão intermédia e elevada. Este padrão surge associado a uma forte continuidade espacial em grande parte da área de estudo, refletindo o efeito mais acentuado do aumento da disponibilidade térmica acumulada neste cenário climático (Anexo XIII).

4.2.3.1. Período 2041–2070

No período 2041–2070, o grupo FAO 200 (Figura A13.1) apresenta uma predominância generalizada das classes de aptidão elevada, com forte continuidade espacial. Esta configuração mantém-se no grupo FAO 300, no qual as classes “Bom” e “Excelente” ocupam extensas áreas do território, sendo pouco expressiva a presença das classes de menor aptidão (Figura A13.2).

Nos ciclos intermédios, nomeadamente FAO 400 e FAO 500, observa-se também uma ampla representação das classes de aptidão elevada (Figura A13.3 e Figura A13.4). As áreas classificadas como “Excelente” e “Bom” apresentam continuidade espacial significativa, sendo reduzida a fragmentação das manchas de maior aptidão. Este padrão evidencia uma melhoria das condições territoriais para grupos com exigências térmicas superiores às dos ciclos mais curtos.

Nos ciclos de maior duração, o grupo FAO 600 (Figura A13.5) apresenta uma presença expressiva das classes “Bom” e “Excelente”, acompanhada por uma redução das áreas classificadas como “Baixo”. No grupo FAO 700, a distribuição territorial passa a ser dominada por classes intermédias e elevadas, com presença relevante das classes “Moderado” e “Bom”, formando áreas contínuas em diferentes zonas do território (Figura A 13.6).

4.2.3.2. Período 2071–2100

No período final do século, os ciclos de maturação mais curtos FAO 200, FAO 300 e FAO 400 apresentam uma predominância praticamente generalizada das classes de aptidão elevada (Figura A13.7, Figura A13.8 e Figura A13.9). Verifica-se, nestes grupos, uma elevada continuidade espacial das áreas classificadas como “Excelente” e “Bom”, traduzindo condições agroecológicas amplamente favoráveis.

Nos ciclos intermédios, o grupo FAO 500 revela igualmente uma forte presença das classes de elevada aptidão, com distribuição territorial contínua e reduzida fragmentação espacial. Este comportamento confirma a consolidação de condições favoráveis ao desenvolvimento de grupos de maturação mais exigentes (Figura A13.10).

Nos ciclos de maior duração, observa-se uma expansão significativa das áreas com aptidão intermédia e elevada. O grupo FAO 600 passa a evidenciar predominância das classes “Bom” e “Excelente”, formando manchas contínuas de elevada aptidão (Figura A13.11). No grupo FAO 700 (Figura A13.12), verifica-se um aumento expressivo das classes “Moderado” e “Bom”, acompanhado pela formação de áreas territorialmente mais contínuas e pela redução das áreas classificadas como “Muito baixo”.

De forma global, o cenário SSP5-8.5 caracteriza-se por uma ampla distribuição territorial de níveis elevados de aptidão agroecológica para todos os grupos FAO, com particular expressão nos ciclos de maturação mais longos. Este resultado sugere que o aumento da disponibilidade térmica poderá favorecer a expansão potencial de grupos FAO de maior duração, conduzindo a uma possível reconfiguração futura da aptidão produtiva da cultura do milho na área de estudo.

4.3. Otimização espacial da distribuição dos ciclos FAO

A aplicação do modelo de alocação espacial (MOLA) permitiu atribuir, para cada cenário considerado, o grupo FAO mais elevado com aptidão adequada a cada célula do território, resultando numa distribuição espacial mutuamente exclusiva dos grupos de maturação do milho para silagem.

No cenário de referência (1981–2010), observa-se predominância do grupo FAO 500 em grande parte da área de estudo, formando manchas relativamente contínuas. Os grupos FAO 600 e 700 surgem em

áreas mais limitadas e localizadas, enquanto os ciclos mais curtos apresentam distribuição residual, o que sugere que, nas condições atuais, a maior parte do território reúne características compatíveis com grupos intermédios de maturação.

No cenário SSP2-4.5 (2041–2070), verifica-se aumento da expressão territorial dos grupos FAO 600 e 700, acompanhado por redução parcial da área atribuída ao FAO 500. No período 2071–2100, esta tendência acentua-se, com maior continuidade espacial dos ciclos longos e retração adicional dos grupos intermédios.

No cenário SSP5-8.5 (2041–2070), a reorganização espacial é mais marcada, observando-se expansão significativa dos grupos FAO 600 e 700 e diminuição da representatividade dos ciclos intermédios. No período 2071–2100, os grupos de maturação mais elevados assumem predominância em grande parte do território, formando manchas amplas e coesas, enquanto os ciclos mais curtos apresentam expressão residual e distribuição fragmentada.

A Figura 4.7 sintetiza, assim, a evolução da alocação otimizada dos grupos de maturação do milho para silagem nos diferentes cenários considerados.

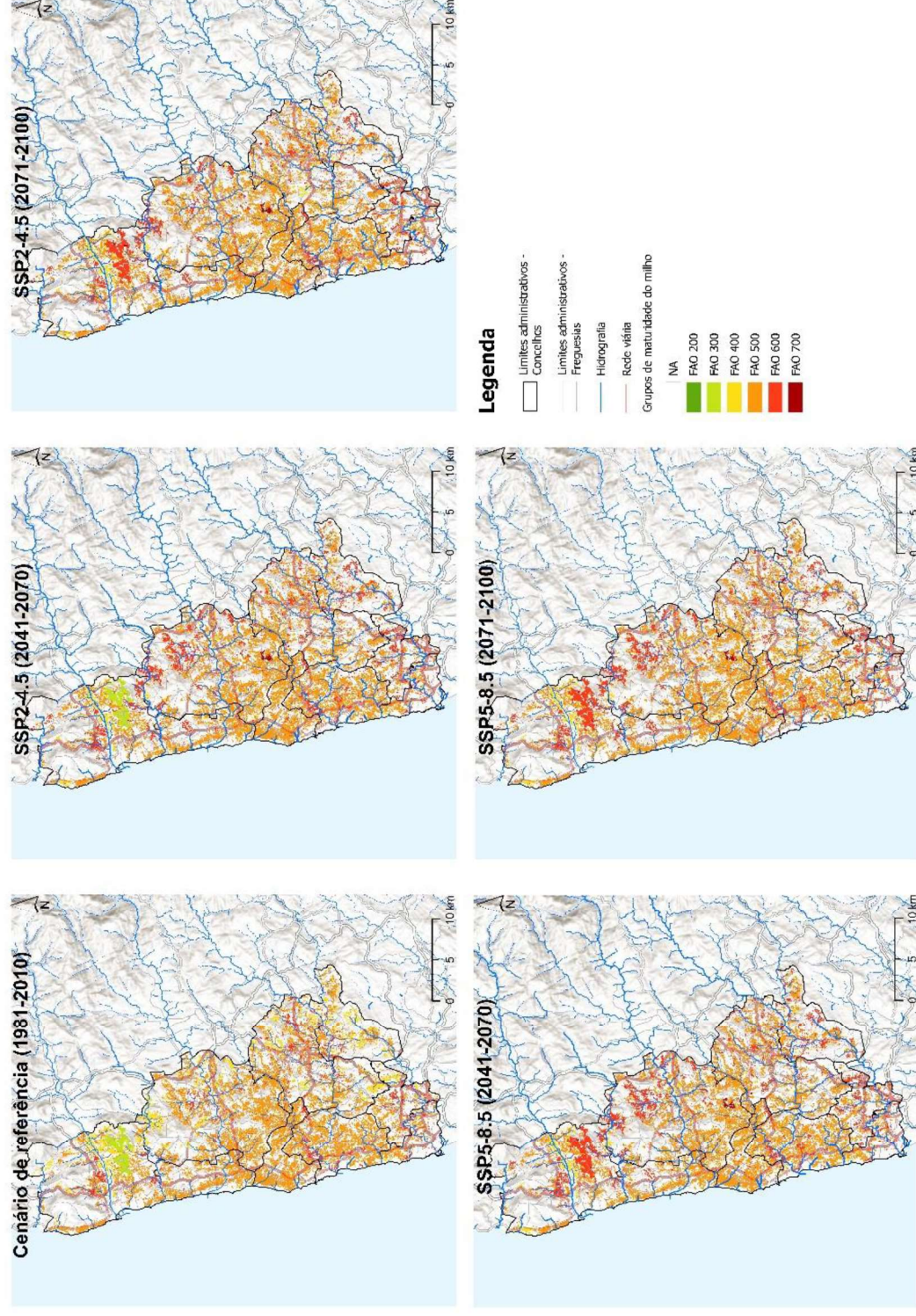


Figura 4.7. Distribuição espacial lotimizada dos grupos FAO do milho para silagem no cenário de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos 2041–2070 e 2071–2100, resultante da aplicação do modelo de alocação espacial (MOLA).

Em termos interpretativos, a otimização espacial evidencia uma deslocação progressiva do território para grupos FAO de maior duração, coerente com a melhoria da adequação biofísica para a produção identificada nas secções anteriores (Figura 4.8). Este resultado sugere que, em cenários climáticos futuros, parte substancial da área de estudo poderá acomodar ciclos mais longos, potencialmente associados a maior produção de biomassa. Numa perspetiva global, importa salientar que esta evolução se manifesta de forma mais evidente nas áreas de maior interioridade ou sujeitas a menor influência marítima, onde o aumento da disponibilidade térmica favorece a adequação de grupos FAO de maior duração.

4.4. Discussão de resultados

4.4.1. Dinâmica espacial e tendências de ocupação da cultura do milho

O conhecimento rigoroso da distribuição espacial do milho e da sua evolução temporal constitui um elemento fundamental para a monitorização das dinâmicas agrícolas, para a avaliação de políticas públicas e para o planeamento dos recursos hídricos e territoriais. A análise comparativa entre a área de milho estimada por deteção/observação remota, em ambiente Google Earth Engine (GEE), e a área declarada no Pedido Único, para o período 2017–2025, evidencia divergências sistemáticas entre a ocupação efetiva do solo observada por satélite e o registo administrativo associado aos mecanismos de apoio agrícola.

Do ponto de vista espacial, as distribuições anuais e a análise de frequência revelam uma forte persistência territorial da cultura, com maior expressão nos concelhos de Barcelos, Vila do Conde, Vila Nova de Famalicão e Póvoa de Varzim, que concentram as áreas de maior continuidade temporal ao longo do período analisado. Este padrão sugere consolidação produtiva e especialização agrícola, indicando que a cultura do milho não corresponde a uma ocupação pontual ou circunstancial, mas antes a uma componente estruturante do sistema agrícola de produção local. A estabilidade espacial é acompanhada por reduzida variação interanual da área estimada por deteção remota, com amplitude inferior a 1 100 ha, reforçando a evidência de estabilidade estrutural da superfície efetivamente cultivada.

Em contraste, os valores declarados no âmbito do PU apresentam trajetória decrescente contínua, acumulando redução próxima de 1 800 ha entre 2017 e 2025. A diferença anual entre ambas as fontes em comparação aumenta progressivamente até 2024 e é acompanhada por coeficiente de determinação praticamente nulo ($R^2 \approx 0,0004$), o que indica ausência de relação linear entre as variações anuais das duas séries temporais. Estes resultados sugerem que a dinâmica declarativa não acompanha a dinâmica de produção local observada.

A predominância de diferenças acumuladas positivas na maioria dos concelhos sugere que a área identificada por deteção remota tende a exceder a área formalmente registada nos sistemas administrativos. Esta discrepância poderá resultar de diversos fatores, nomeadamente diferenças na delimitação espacial das parcelas, existência de áreas cultivadas não submetidas a candidatura, condicionantes associadas aos critérios de elegibilidade administrativa, bem como erros ou omissões no processo declarativo. Adicionalmente, alterações na estrutura de exploração agrícola, designadamente situações de arrendamento informal ou transição geracional, poderão contribuir para desajustes temporários entre a ocupação efetiva do solo e os registos administrativos. Acresce ainda que, no âmbito do regime da pequena agricultura, o reduzido nível de detalhe exigido no processo declarativo poderá conduzir à sub-representação de determinadas culturas nos registos do Pedido Único, apesar da sua efetiva presença no território, identificada através de deteção remota.

A quantificação oficial das superfícies ocupadas por milho é realizada por entidades competentes, como o INE, o IFAP e outros organismos responsáveis pela produção e gestão de informação agrícola. A referência feita neste estudo a fontes administrativas, nomeadamente às declarações dos agricultores no âmbito dos pedidos de apoio da Política Agrícola Comum (PAC), ao Sistema de Identificação Parcelar (SIP) e aos sistemas de gestão do IFAP, não pretende substituir, comparar ou avaliar as metodologias estatísticas oficiais utilizadas por essas entidades. Neste trabalho, essas fontes são consideradas apenas como informação de enquadramento e apoio. A metodologia adotada tem uma natureza distinta, assente na análise espacial e na observação remota, com o objetivo de identificar e caracterizar áreas cultivadas com milho no território em estudo. Neste contexto, reconhece-se que as bases administrativas podem apresentar limitações operacionais, como a dependência da declaração do produtor, eventuais erros de registo, desfasamentos temporais na disponibilização dos dados e ausência de uma validação espacial contínua e independente.

Importa igualmente considerar fatores metodológicos. A classificação baseada em imagens Sentinel-2 poderá sobrestimar pontualmente a área de milho em contextos de elevada heterogeneidade parcelar, proximidade entre culturas com resposta espectral semelhante ou presença de sucessões culturais que dificultam a discriminação. Ainda assim, a consistência espacial dos resultados e a estabilidade temporal observada sugerem que a divergência identificada não pode ser atribuída exclusivamente a erro ou incertezas de classificação.

No seu conjunto, os resultados apontam para dissociação crescente entre ocupação efetiva e registo administrativo ao longo do período analisado. Embora não seja possível estabelecer causalidade direta apenas com base nesta análise desenvolvida, a diferença persistente entre ambas as fontes evidenciam a necessidade de aprofundar o estudo da relação entre superfície cultivada, superfície declarada e enquadramento institucional da produção na relação com as opções e implicações práticas de políticas públicas, investimento e encargos dos produtores e ajustamento contínuo entre os incentivos, a equidade e justiça entre produtores e culturas.

Neste contexto, o desenvolvimento de algoritmos de classificação automática de imagens de satélite surge como uma ferramenta particularmente relevante para a estimativa das áreas cultivadas com milho. A disponibilização gratuita das imagens dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, no âmbito do programa europeu Copernicus, permite monitorizar de forma sistemática e recorrente a ocupação agrícola do território com resolução espacial adequada às explorações agrícolas europeias.

Este trabalho relaciona-se com outros estudos realizados em Portugal e noutros países europeus demonstrando que algoritmos de aprendizagem automática, como *Random Forest*, *Support Vector Machines* (SVM) e Redes Neuronais, alcançam níveis elevados de precisão na classificação de culturas agrícolas.

A utilização destas metodologias apresenta diversas vantagens relativamente às estatísticas agrícolas convencionais. Em primeiro lugar, permite obter estimativas espacialmente explícitas da distribuição do milho, identificando a localização exata das parcelas cultivadas. Em segundo lugar, possibilita a atualização frequente da informação ao longo da campanha agrícola, permitindo acompanhar alterações intra-anuais e detetar situações de abandono ou mudança de cultura. Finalmente, constitui um mecanismo independente de validação das áreas declaradas pelos agricultores nos pedidos de apoio, contribuindo para aumentar a transparência e a eficiência dos sistemas de controlo da PAC.

A comparação entre as áreas estimadas por classificação de imagens de satélite e as superfícies declaradas pelos agricultores constitui atualmente uma das principais linhas de desenvolvimento dos sistemas de monitorização agrícola na União Europeia. Os programas Sen4CAP e os sistemas operacionais implementados em vários Estados-Membros demonstraram que a integração de algoritmos de classificação multitemporal com dados administrativos permite melhorar significativamente os processos de controlo e monitorização dos apoios agrícolas (European Space, 2020).

Assim, a análise da dinâmica espacial da cultura do milho baseada em deteção remota representa uma evolução metodológica importante relativamente às abordagens estatísticas tradicionais. Para além de fornecer estimativas mais detalhadas e atualizadas das áreas cultivadas, permite compreender padrões territoriais de expansão, retração ou deslocação da cultura, constituindo uma ferramenta estratégica para a gestão agrícola, a avaliação das políticas de apoio e o desenvolvimento sustentável dos territórios rurais.

4.4.2. Distribuição e evolução da aptidão agroecológica para o milho em cenários climáticos

A análise comparativa da aptidão agroecológica nos diferentes cenários evidencia alteração progressiva do enquadramento biofísico do território, particularmente no que respeita à viabilidade de grupos FAO de maturação mais longa. No cenário de referência, os ciclos curtos e intermédios apresentam maior adequação, enquanto os ciclos longos permanecem restringidos por limitações térmicas e, em menor medida, pela combinação com fatores fisiográficos e pedológicos.

Este padrão sugere que, no contexto atual, a principal restrição à adoção generalizada de ciclos longos estará associada à disponibilidade térmica acumulada ao longo do ciclo cultural. O aumento gradual da adequação dos grupos FAO 500, 600 e 700 nos cenários futuros, sobretudo no SSP5-8.5, confirma que a elevação da temperatura média e da acumulação de graus-dia tende a alargar a viabilidade potencial destes ciclos na área de estudo.

Do ponto de vista agronómico, esta transição poderá traduzir-se num maior potencial de produção de biomassa por hectare e, consequentemente, num aumento do valor energético da silagem. Contudo, a concretização desse potencial dependerá da disponibilidade e gestão adequada dos fatores de produção,

nomeadamente da água para rega, da fertilização, da proteção fitossanitária, da mão de obra e da mecanização agrícola. Assim, a evolução das condições agroclimáticas favoráveis ao cultivo do milho não implica apenas um aumento da capacidade produtiva, mas também uma maior exigência ao nível dos recursos e dos investimentos necessários para sustentar sistemas de produção mais intensivos.

Esta mudança do padrão produtivo apresenta implicações diretas nos restantes componentes do sistema agrícola, influenciando a gestão dos recursos naturais, a organização do trabalho, os custos de produção e a eficiência operacional das explorações. Consequentemente, para que o potencial produtivo adicional possa ser efetivamente expresso, torna-se necessário proceder a ajustamentos e adaptações nos restantes elementos do sistema, garantindo que os recursos disponíveis e as infraestruturas de suporte acompanham as novas exigências produtivas.

A diferença de intensidade entre os cenários considerados é particularmente relevante. No SSP2-4.5 observa-se melhoria gradual e espacialmente diferenciada, enquanto no SSP5-8.5 a evolução é mais rápida e territorialmente mais abrangente. Tal resultado evidencia que a magnitude da alteração climática projetada influencia diretamente a configuração espacial da aptidão agrícola. Importa, contudo, sublinhar que os ciclos curtos mantêm elevada aptidão em todos os cenários considerados, o que indica que a cultura do milho continua tecnicamente viável na região sob diferentes grupos de maturação. Assim, os resultados não sugerem substituição obrigatória dos ciclos mais curtos, mas antes um alargamento do leque de opções agronómicas disponíveis.

Apesar da tendência favorável evidenciada pelos resultados, a interpretação deve ser efetuada com prudência. A modelação baseia-se em médias climatológicas projetadas e não incorpora, de forma explícita, a frequência de eventos extremos, como ondas de calor, défices hídricos intraestacionais, precipitações intensas ou episódios de encharcamento, fatores que poderão condicionar o desempenho real da cultura no futuro.

A relação da aptidão agroecológica e as alterações climáticas indica que o aumento da temperatura média modifica progressivamente a adequação agroclimática das culturas, conduzindo frequentemente a deslocamentos espaciais das áreas mais favoráveis e ao alargamento das condições de cultivo para variedades de ciclo mais longo (Ramirez-Villegas et al., 2013; Zabel et al., 2014). A expansão dos grupos FAO 500–700 encontra-se alinhada com a literatura sobre disponibilidade térmica (Buhiniček et al., 2021). Estes autores demonstram que: a acumulação de graus-dia é o principal fator limitante dos ciclos tardios; o aquecimento climático favorece grupos FAO mais elevados; e regiões atualmente

limitadas termicamente poderão acomodar híbridos mais longos. Esta evidência suporta diretamente a conclusão sobre o aumento da aptidão dos grupos FAO 500, 600 e 700; aumento da produção de biomassa e aumento do potencial energético da silagem. Esta evolução permite maior interceção de radiação solar ao longo da estação de crescimento maior evapotranspiração; maiores necessidades de rega; maior extração de nutrientes; maior pressão fitossanitária.

Estes trabalhos sustentam que a melhoria da aptidão não se traduz em ganhos produtivos sem reforço dos restantes fatores de produção. A sua interpretação é consistente com a literatura recente baseada no IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change; 2021–2023). Os estudos demonstram que o cenário SSP2-4.5 indica para alterações graduais, que o cenário SSP5-8.5 gera alterações mais intensas, a magnitude do aquecimento influencia diretamente a distribuição espacial da aptidão agrícola. Estes trabalhos demonstram que: i) o aumento da temperatura média não implica necessariamente aumento de produtividade; ii) ondas de calor durante a floração podem provocar perdas significativas; iii) os défices hídricos intraestacionais se tornam-se mais frequentes; iv) e que os eventos extremos podem anular os benefícios identificados pelos modelos de aptidão média (Peichl et al., 2019).

4.4.3. Reconfiguração territorial e implicações estratégicas da otimização espacial

A distribuição resultante da otimização espacial evidencia alteração progressiva do perfil dominante de maturação no território, particularmente nos cenários futuros. No cenário de referência, a predominância do FAO 500 sugere que este grupo representa, de forma geral, o melhor compromisso entre exigência biofísica e potencial produtivo no contexto atual da bacia leiteira estudada.

Nos cenários projetados, observa-se substituição gradual dos grupos intermédios por ciclos de maior duração. No SSP2-4.5, esta transição manifesta-se de forma progressiva, com aumento da expressão dos grupos FAO 600 e 700. No SSP5-8.5, a reorganização espacial é mais marcada, culminando no predomínio territorial dos grupos mais longos no horizonte 2071–2100.

Esta dinâmica demonstra que o aumento da adequação biofísica média, identificado na análise anterior, quando sujeito a um critério hierárquico orientado para a produção de silagem, conduz a uma reorganização espacial coerente com a maximização do potencial produtivo. Ou seja, não se trata apenas de melhoria difusa das classes de aptidão, mas de uma alteração concreta na distribuição ótima dos grupos de maturação.

Do ponto de vista agronómico, a expansão dos ciclos mais longos sugere potencial aumento da produção de biomassa por unidade de superfície, dado o maior período de crescimento e acumulação de matéria seca. No entanto, esta vantagem potencial deverá ser avaliada em articulação com aspetos operacionais e sistémicos, como disponibilidade de água, risco de atrasos na colheita, capacidade de ensilagem e integração com rotações forrageiras.

A predominância crescente de ciclos de maior duração poderá implicar prolongamento do período de ocupação do solo pelo milho, condicionando a calendarização das operações culturais e a instalação de culturas de inverno. Neste sentido, a transição para grupos FAO mais elevados poderá exigir ajustamentos na organização do sistema forrageiro, e não apenas na escolha varietal.

Importa sublinhar que a otimização realizada assenta exclusivamente em critérios biofísicos médios e na hierarquização definida para a produção de silagem, não incorporando variabilidade interanual, condicionantes económicas, disponibilidade real de regadio, acessibilidade parcelar ou preferências de gestão dos produtores. Por essa razão, os mapas produzidos devem ser interpretados como instrumentos de apoio à decisão e de orientação estratégica, e não como prescrições diretas de uso do solo.

A mudança da distribuição ótima dos grupos FAO em função de cenários climáticos e critérios de produção não altera apenas aptidões, mas reorganiza espacialmente a estrutura territorial ótima. A substituição progressiva de grupos FAO encontra-se bem documentada na literatura de adaptação agrícola (FAO, 2018; Food and Agriculture Organization of the United, 2018; Harrison et al., 2006; van Ittersum et al., 2013; Verburg et al., 2011). As culturas não mudam apenas produtividade, mudam distribuição espacial ótima em que cenários mais quentes, apresentam maior flexibilidade varietal em que a reorganização territorial é uma resposta sistémica, não linear. A dominância de ciclos FAO 600–700 no cenário SSP5-8.5 tem base em literatura fisiológica e agronómica.

Considerando que os modelos biofísicos ignoram decisões reais dos produtores e que estes enfatizam limites dos modelos de aptidão sem economia e adaptação comportamental podemos indicar que mapas de aptidão são cenários de potencial, não prescrições. A otimização espacial indica para um potencial técnico que carecem de decisões reais numa combinação de economia, risco, gestão e políticas. Neste quadro podemos indicar que a expansão de ciclos longos altera o calendário agrícola com implicações nas janelas de sementeira de culturas de inverno e a na integração milho–pastagens. Este facto indica para adaptações da reorganização sistémica acompanhado por mudanças em todo o sistema produtivo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da distribuição e evolução das culturas, num quadro de mudança climática, apoia a adaptação dos sistemas produtivos. Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a distribuição espacial da cultura do milho na bacia leiteira do Entre Douro e Minho reflete uma relação estreita entre condições agroecológicas, estrutura fundiária e organização dos sistemas de produção.

A persistência espacial da cultura ao longo do período analisado evidencia uma elevada estabilidade funcional, confirmando o seu papel estruturante nos sistemas forrageiros associados à produção leiteira regional.

A integração de deteção remota, análise espacial e modelação agroecológica permitiu não apenas caracterizar a distribuição e evolução temporal da cultura, mas também identificar os principais fatores biofísicos que condicionam a sua localização preferencial. Os resultados demonstram que a concentração territorial do milho está fortemente associada a condições climáticas, fisiográficas e edáficas favoráveis, reforçando a coerência entre aptidão biofísica e ocupação efetiva do solo.

Paralelamente, a comparação entre a área estimada por deteção remota e a área declarada no Pedido Único evidenciou discrepâncias sistemáticas entre ambas as fontes. Estas diferenças sugerem limitações na representatividade da informação administrativa enquanto indicador da ocupação real do território agrícola, reforçando a utilidade da observação remota como instrumento complementar de monitorização agrícola, sobretudo em contextos de elevada fragmentação fundiária e diversidade produtiva.

No domínio da aptidão agroecológica, os resultados evidenciam uma dinâmica territorial e aptidão agroecológica com uma diferenciação territorial clara entre grupos FAO de maturação, bem como uma evolução consistente sob cenários climáticos futuros. No cenário de referência, predominam os ciclos curtos e intermédios, enquanto os ciclos longos apresentam restrições associadas principalmente à limitação térmica. Nos cenários SSP2-4.5 e, de forma mais acentuada, no SSP5-8.5, observa-se uma reorganização progressiva da aptidão territorial, com expansão dos grupos FAO de maior duração, associada ao aumento da disponibilidade térmica acumulada.

Este comportamento confirma que a variável climática dominante na limitação atual da cultura do milho é a disponibilidade térmica, influenciando diretamente a viabilidade dos diferentes grupos de

maturação. Em cenários futuros, esta limitação tende a atenuar-se, promovendo uma reconfiguração das condições de aptidão agroecológica.

Os resultados da otimização espacial (MOLA), demonstram uma reconfiguração espacial e otimização produtiva, em que a melhoria da aptidão agroecológica não se traduz apenas em ganhos graduais, mas numa reorganização estrutural da distribuição ótima dos grupos FAO. No conjunto observa-se uma deslocação progressiva do sistema produtivo para ciclos de maior duração, particularmente em cenários de maior intensidade climática. Esta evolução reflete uma coerência entre o aumento da aptidão biofísica e a maximização do potencial produtivo da cultura.

Neste contexto, o sistema agrícola tende a evoluir para um modelo mais flexível do ponto de vista varietal, com coexistência de diferentes grupos de maturação, embora com crescente importância dos ciclos mais longos em cenários de aquecimento elevado.

Os resultados obtidos apresentam implicações relevantes em três domínios principais:

- (i) Políticas públicas e monitorização agrícola: as discrepâncias entre dados administrativos e deteção remota reforçam a necessidade de integrar sistemas de observação da Terra nos mecanismos de monitorização agrícola, contribuindo para maior precisão, transparência e eficiência na gestão de políticas públicas.
- (ii) Ordenamento e planeamento agrícola: a reconfiguração espacial da aptidão agroecológica evidencia a necessidade de integrar cenários climáticos dinâmicos no planeamento agrícola, considerando não apenas a ocupação atual do solo, mas também a sua evolução potencial e a adaptação varietal.
- (iii) Sistemas forrageiros e produção leiteira: a expansão dos ciclos FAO mais longos implica alterações na calendarização das operações culturais, prolongamento da ocupação do solo e reorganização das rotações forrageiras. Esta dimensão é particularmente relevante em sistemas leiteiros intensivos, onde a sincronização entre produção vegetal e consumo animal é determinante.

Este trabalho contribui para três áreas principais do conhecimento:

- i. integração de deteção remota com dados administrativos para monitorização agrícola;
- ii. avaliação conjunta de aptidão agroecológica e otimização espacial (MOLA) aplicada a sistemas forrageiros;

- iii. análise da reconfiguração territorial da cultura do milho sob cenários climáticos SSP.

Adicionalmente, reforça a importância de abordagens espaciais dinâmicas na análise de sistemas agrícolas, ultrapassando limitações de análises estatísticas pontuais e promovendo uma leitura territorial integrada.

Apesar da robustez dos resultados obtidos na investigação, devem ser reconhecidas limitações relevantes.

- i. a classificação baseada em imagens Sentinel-2 pode introduzir incertezas associadas à heterogeneidade parcelar, semelhança espectral entre culturas e sucessões culturais intra- anuais.
- ii. a modelação da aptidão agroecológica baseia-se em médias climatológicas e cenários projetados, não incorporando explicitamente variabilidade interanual nem eventos extremos (ondas de calor, secas ou precipitações intensas), nem riscos fenológicos críticos como floração e enchimento do grão.
- iii. o modelo de otimização espacial (MOLA) considera exclusivamente critérios biofísicos, não integrando fatores económicos, comportamentais, institucionais ou de disponibilidade real de recursos, como água ou capacidade operacional das explorações.

Importa igualmente salientar que o presente estudo foi desenvolvido à escala regional, tendo como principal objetivo compreender os padrões territoriais associados à distribuição da cultura do milho e os fatores agroecológicos que condicionam a sua implantação. Neste sentido, os resultados obtidos permitem identificar onde a cultura se concentra, como evoluiu ao longo do tempo e que condições ajudam a explicar a sua persistência em determinadas áreas da bacia leiteira do Entre Douro e Minho. No contexto específico da bacia leiteira do Entre Douro e Minho, importa ainda referir que a disponibilidade de literatura científica com enfoque integrado nas dimensões espacial, agroecológica e produtiva da cultura do milho é ainda limitada. Neste enquadramento, o presente trabalho assume um carácter essencialmente integrador, procurando articular diferentes fontes de dados, metodologias e escalas de análise numa perspetiva coerente de leitura territorial. Assim, os resultados apresentados devem ser interpretados como um contributo para a compreensão das dinâmicas da cultura do milho nesta região, constituindo uma base de suporte para desenvolvimentos futuros, e não uma representação exaustiva ou definitiva do sistema em análise.

A definição de estratégias de produção, a seleção varietal, a adequação dos ciclos culturais e a

adaptação das práticas agronômicas dependem de fatores específicos de cada exploração agrícola, nomeadamente das características locais do solo, da disponibilidade efetiva de água, das condições microclimáticas, da capacidade operacional das explorações e dos objetivos produtivos associados a cada sistema de produção.

Embora a revisão bibliográfica e o enquadramento metodológico tenham considerado a relevância da componente fenológica na caracterização do comportamento da cultura do milho, a abordagem desenvolvida centrou-se predominantemente na análise espacial e agroecológica à escala regional. Os índices de vegetação e as métricas temporais utilizadas foram aplicados sobretudo como suporte à identificação e caracterização espacial da cultura, não tendo sido realizada uma monitorização fenológica detalhada de parcelas representativas nem uma análise específica das métricas fenológicas ao longo do ciclo cultural. Neste sentido, desenvolvimentos futuros poderão integrar análises fenológicas à escala da parcela, permitindo aprofundar a compreensão da dinâmica temporal da cultura, da sua variabilidade territorial e da resposta dos diferentes ciclos de maturação às condições agroclimáticas locais.

Assim, os resultados representam potencial biofísico e não previsões determinísticas da realidade futura. Importa ainda salientar que o estudo foi desenvolvido à escala regional, permitindo identificar padrões territoriais de distribuição, persistência e aptidão da cultura do milho. Contudo, a tomada de decisão agronómica operacional exige análises à escala da parcela, onde fatores locais como solo, microclima, gestão da exploração e objetivos produtivos assumem papel determinante. Assim, os resultados devem ser interpretados como um enquadramento estratégico de apoio ao planeamento agrícola, e não como recomendações diretas de gestão ao nível da exploração.

Com base nos resultados obtidos, identificam-se as seguintes linhas de investigação prioritárias:

- i. integração de séries temporais de alta resolução (Sentinel-1 e Sentinel-2) com inteligência artificial para melhoria da discriminação de culturas;
- ii. inclusão explícita de eventos extremos e variabilidade intra-anual em modelos de aptidão;
- iii. integração de modelos agroclimáticos com modelos económicos de decisão agrícola;
- iv. desenvolvimento de modelos MOLA multiobjetivo com componentes socioeconómicas;
- v. análise da interação entre políticas da PAC e mudanças reais de uso do solo;
- vi. modelação integrada entre produção vegetal e sistemas pecuários (*feed-forage coupling*);
- vii. desenvolvimento de análises fenológicas detalhadas à escala da parcela.

De forma global, o presente estudo demonstra que a cultura do milho na bacia leiteira do Entre Douro e Minho se insere num sistema caracterizado por estabilidade espacial no curto prazo e elevada dinâmica potencial no médio e longo prazo, fortemente condicionada por alterações climáticas e por processos de reconfiguração agroecológica.

A articulação entre deteção remota, modelação de aptidão agroecológica e otimização espacial constitui uma abordagem metodológica robusta para apoiar o planeamento agrícola, a monitorização territorial e a adaptação dos sistemas produtivos às alterações climáticas. Mais do que uma representação estática da realidade agrícola regional, este trabalho fornece um enquadramento integrado da relação entre cultura, território e clima, contribuindo para uma leitura mais informada e estratégica da evolução futura dos sistemas agrícolas.

Assim, mais do que uma representação fechada da realidade agrícola regional, o presente trabalho constitui uma base de enquadramento territorial e agroecológico que contribui para uma leitura mais integrada da relação entre agricultura, território e alterações climáticas. Ao evidenciar o papel estratégico da cultura do milho na bacia leiteira do Entre Douro e Minho, reforça-se também a necessidade de aprofundar instrumentos de análise, monitorização e planeamento capazes de apoiar a sustentabilidade futura dos sistemas agrícolas regionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrogarante. (2023). Análise setorial do milho. In Agrogarante (Ed.).
- Agros. (2024). O cooperativismo leiteiro no Entre Douro e Minho. 48. <https://www.agros.pt/wp-content/uploads/2025/01/revista-agros-N56.pdf>
- Ahamed, T., Rao, K., & Murthy, J. (2000). GIS-based fuzzy membership model for crop-land suitability analysis. *AGRICULTURAL SYSTEMS*, 63(2), 75-95.
- Aires, N. (2022). *Relationship of vegetation index with corn yield in irrigated fields in Rio Grande do Sul* [Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP)]. https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/28592/DIS_PPGAP_2022_AIRES_N%c3%9aBIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alonso, J., Grana, A., Santos, S., & Paredes, C. (2003). IX Conferencia Iberoamericana de SIG; El VIII Congreso Nacional de la AESIG Y La II Reunión del GMCSIGT (Asociación de Geógrafos Españoles); Sesión B: Desarrollo Sostenible 23-28 de Setembro de 2003. *IX Conferencia Iberoamericana de SIG; El VIII Congreso Nacional de la AESIG Y La II Reunión del GMCSIGT (Asociación de Geógrafos Españoles); Sesión B: Desarrollo Sostenible*.
- Althoff, D., Bazame, H. C., Filgueiras, R., & Alvino, F. C. G. (2018, 2018/10/02). *Diferentes índices de vegetação no monitoramento agrícola da cultura do milho* Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – ConBAP 2018, Curitiba, Paraná.
- Anpromis. (2025). Eco news milho 2025. In A. N. P. M. Sorgo (Ed.): Eco News.
- Aryal, J., & Shrestha, A. (2020). Fuzzy logic approach for land suitability assessment using GIS. *Environmental Earth Sciences*, 79. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08868-z>
- Azevedo, M. (2023). *Intensificação do Sistema de Culturas Forrageiras do Noroeste Atlântico de Portugal: Performance Agronómica e Económica da Sucessão Milho-Milho Encadeada com Cereais Imaturos de Outono Inverno*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.].
- Barreiros, L., Dimas, B., Costa, C., Palha, J., Maças, B., Albino, B.,...Mendes, J. (2018). *Estratégia Nacional para a Promoção da Produção de Cereais (ENPPC)*.
- Belgiu, M., & Dragut, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, 114, 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Bhatti, M., Gilani, H., Ashraf, M., Iqbal, M., & Munir, S. (2024). Field validation of NDVI to identify crop phenological signatures. *PRECISION AGRICULTURE*, 25(5), 2245-2270. <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10165-6>
- Braga, G. (2008). Estudos sobre milho silagem e qualidade forrageira em sistemas leiteiros. 28(3).
- Brito, L., Alonso, J., Mamede, J., & Rey-Grana, J. (2011). Gestão de efluentes nas explorações leiteiras do Entre Douro e Minho. *Revista de Ciências Agrárias*, 34(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.19084/rca.15952>
- Buhiniček, I., Kaučić, D., Kozić, Z., Jukić, M., Gunjača, J., Šarčević, H.,...Šimić, D. (2021). Trends in Maize Grain Yields Across Five Maturity Groups in a Long-Term Experiment with Changing Genotypes. *Agriculture*, 11(9), 887-887. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090887>
- CAP. (2023). *INE publica estatísticas agrícolas 2023*. I. P. Instituto Nacional de Estatística, L. Av. António José de Almeida, & Portugal. <https://www.cap.pt/noticias-cap/agricultura-e-floresta/ine-publica-estatisticas-agricolas-2023>
- Coimbra, J. (2023, 2023). *Seca: Na Quinta da Cholda produz-se mais com menos água...*, YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=2ZBrf1SA95A>
- Coixão, A. (2018). *Estudo de parâmetros agronômicos e nutricionais de variedades de milho forragem*. https://www.academia.edu/41750185/Instituto_Polit%C3%A9cnico_de_Viana_do_Castelo_ESTUDO_DE_PAR%C3%82METROS_AGRON%C3%93MICOS_E_NUTRICIONAIS_DE_VARIEDADES_DE_MILHO_FORRAGEM_Relat%C3%B3rio_Final_de_Curso_Licenciatur

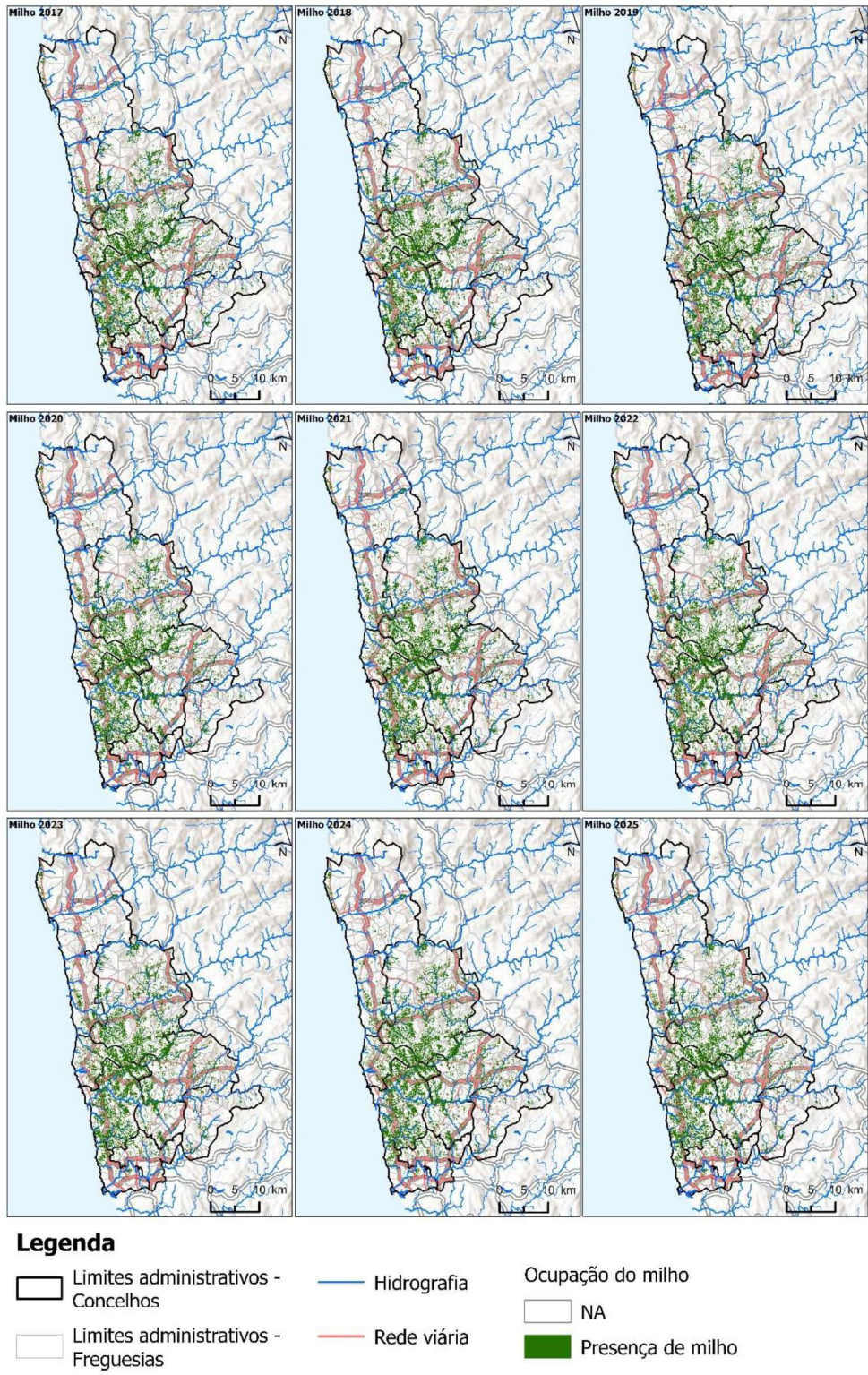
- [a em Agronomia Ramo de Produ%C3%A7%C3%A3o Vegetal](#)
- Curado, J., Carvalho, T., & Barbosa, J. (2007). *Estratégias para a Sustentabilidade da Bacia Leiteira do Entre Douro e Minho* https://apdr.pt/data/atas/congresso_2007/pdf/96.pdf
- Dadrasi, A., Chaichi, M., Nehbandani, A., Soltani, E., Nemati, A., Salmani, F.,...Yousefi, A. (2023). Global insight into understanding wheat yield and production through Agro-Ecological Zoning. *SCIENTIFIC REPORTS*, 13(1), Article 15898. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43191-x>
- Delgado, C., & Marques, T. (2012). Reserva Agrícola Nacional, expansão urbana e fragmentação da paisagem na “bacia leiteira primária” de Entre-Douro-e-Minho. <em data-end="523" data-start="455">Geografia: Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto (III série, vol. I), 27. <https://doi.org/https://ojs.letras.up.pt/index.php/geografia/article/view/17>
- DGADR. (2020). *Cartas de Solos e Capacidade de Uso – Série SROA / CNROA*. D. G. d. A. e. D. Rural. <https://www.dgadr.gov.pt/cartografia/cartas-solos-cap-uso-digital>
- DGAV. (2024). *Relatório de Acompanhamento de 2023*. https://www.dgav.pt/wp-content/uploads/2024/03/DGAV_RelatorioMilhoGM_2023.pdf
- Djalovic, I., Grahovac, N., Stojanović, Z., Đurović, A., Živančev, D., Jakšić, S.,...Prasad, P. V. V. (2024). Nutritional and Chemical Quality of Maize Hybrids from Different FAO Maturity Groups Developed and Grown in Serbia. *Plants*, 13(1), 143. <https://doi.org/10.3390/plants13010143>
- European Space, A. (2020). Sentinels for Common Agricultural Policy (SEN4CAP).
- Eurostat. (2024). *Título: Agricultural production – crops. Statistics Explained*. Eurostat Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/26212.pdf>
- FAO. (1996). *Agro-ecological Zoning (AEZ): Chapter 3 – Definitions*. <https://www.fao.org/4/w2962e/w2962e-03.htm>
- FAO. (2007). *Land Evaluation: Towards a Revised Framework*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR)*. F. a. A. O. o. t. U. Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content>
- FAO. (2018). *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. FAO.
- Filipe, M., Lomba, A., Honrado, J., & Cardoso, A. (2023). City-Region Food Systems and Biodiversity Conservation: The Case Study of the Entre-Douro-e-Minho Agrarian Region. *SUSTAINABILITY*, 15(6), Article 5021. <https://doi.org/10.3390/su15065021>
- Filipe, M., Lomba, A., Honrado, J., Cardoso, A., border-box, d. a.-h. f. c. f.-d. c. p.-c.-c. o. f.-o.-d. d.-d.-c. i. p.-c.-d. s. b.-s., 0px, m. p. p.,...">. (2025). Sistemas de alimentação urbano-regionais e conservação da biodiversidade: o estudo de caso da região agrária do Entre-Douro-e-Minho. *Sustainability*, 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su15065021>
- Fischer, G. (2020). *GAEZ v4: Zonas Agroecológicas Globais – Documentação do Modelo*.
- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., Van Velthuizen, H., Verelst, L., & Wiberg, D. (2012). *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0)*. <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/gaez>
- Gallardo-Romero, D., Apolo-Apolo, O., Martínez-Guanter, J., & Pérez-Ruiz, M. (2023). Multilayer Data and Artificial Intelligence for the Delineation of Homogeneous Management Zones in Maize Cultivation. *REMOTE SENSING*, 15(12), Article 3131. <https://doi.org/10.3390/rs15123131>
- Gaspar, N. (2007). *Importância do milho silagem para o setor leiteiro nacional* <https://www.anpromis.pt/images/eventos/cg07/c12.pdf>
- Harrison, P. A., Butterfield, R. E., & Downs, S. (2006). Climate change and the future for European crop production: implications for land suitability. *European Journal of Agronomy*.
- Hengl, T., de Jesus, J., Heuvelink, G., Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotic, A.,...Kempen, B. (2017).

- SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12(2), Article e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- INE. (2024). *Inquérito à Estrutura das Explorações Agrícolas 2023 – Retrato da Agricultura Nacional*. I. CAP. <https://www.confagri.pt/content/uploads/2024/12/10IEExplorAgr2023.pdf>
- INIAV. (2019). *Carta de Solos de Portugal – Notas Explicativas*.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Issue. C. U. Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPMA. (2021). *Normais Climatológicas 1981–2010 – Portugal Continental*. I. P. d. M. e. d. Atmosfera. <https://www.ipma.pt/opencms/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/>
- Kandari, A. M., Baja, S., Ala, A., & Kaimuddin. (2013). Agroecological zoning and land suitability assessment for maize (*Zea mays* L.) development in Buton Regency, Indonesia. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 2(6). <https://doi.org/10.11648/j.aff.20130206.11>
- Karger, D., Conrad, O., Böhrer, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.,...Kessler, M. (2017). Data Descriptor: Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *SCIENTIFIC DATA*, 4, Article 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2021). *Geographical Information Systems and Science* (5 ed.). Wiley.
- Malczewskik, J. (2005). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. In. *International Journal of Geographical Information Science*.
- Martini, L. C. P., & Souza, M. (2024). Geotecnologias de acesso livre aplicáveis à agricultura familiar de precisão. *Revista Brasileira de Geomática*, 12, 197-218.
- Mouta, N., Silva, R., Pinto, E. M., Vaz, A. S., Alonso, J. M., Gonçalves, J. F.,...Vicente, J. R. (2023). Sentinel-2 Time Series and Classifier Fusion to Map an Aquatic Invasive Plant Species along a River—The Case of Water-Hyacinth. *Remote Sensing*, 15(13). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15133248>
- Nabati, J., Chaichi, M., Nehbandani, A., Soltani, E., Nemati, A., Salmani, F., & Yousefi, A. (2023). An integrated approach to land suitability for agroecological zoning: A case study on chickpea in semi-arid regions of Iran. *Environmental Development & Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02127-7>
- Neves, G. (2023). *Comparação e avaliação de índices de vegetação (NDVI, NDMI e NDRE) obtidos por programas de observação da Terra e por plataformas digitais na cultura do milho* [Dissertation, Escola Superior Agrária de Santarém]. Santarém.
- Neves, S., Silva, P., Oliveira, G., Souza, J., & Cardozo, É. (2025). Correlação entre a produtividade do milho e os índices de vegetação utilizando imagens do Sentinel-2. *Revista de Gestão e Secretariado (GeSec)*, 16(4), 1-19. <https://doi.org/10.7769/gesec.v16i4.4811>
- Nordin, S., Sturge, J., Ayoub, M., Jones, A., McKee, K., Dahlberg, L.,...Elf, M. (2022). Recognition of Maize Phenology in Sentinel Images with Machine Learning. *SENSORS*, 22(1), Article 94. <https://doi.org/10.3390/s22010094>
- Norte, C. (2009). *Plano Regional de Ordenamento do Território do Norte (PROT-Norte): Relatório Técnico*.
- Norte, D. (2023). *Relatórios Regionais de Acompanhamento Agrícola – Campanhas Múltiplas*.
- Parent, B., Leclere, M., Lacube, S., Semenov, M. A., Welcker, C., & Tardieu, F. (2019). Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904099116>
- Peichl, M., Thober, S., Samaniego, L., Hansjürgens, B., & Marx, A. (2019). Climate impacts on long-term silage maize yield in Germany. *Scientific Reports*, 9, 7674. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44126-1>

- Ramirez-Villegas, J., Challinor, A. J., Thornton, P. K., & Jarvis, A. (2013). Implications of regional improvement in global climate models for agricultural impact research. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024018>
- Segarra, J., Buchaillet, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>
- Soares, D., Paredes, P., Paco, T., & Rolim, J. (2025). Projected Bioclimatic Changes in Portugal: Assessing Maize Future Suitability. *AGRONOMY-BASEL*, 15(3), Article 592. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030592>
- Soares, D., Paço, T., & Rolim, J. (2023). Assessing Climate Change Impacts on Irrigation Water Requirements under Mediterranean Conditions-A Review of the Methodological Approaches Focusing on Maize Crop. *AGRONOMY-BASEL*, 13(1), Article 117. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010117>
- Strunk, J., Gould, P., Packalen, P., Gatziolis, D., Greblowska, D., Maki, C., & McGaughey, R. (2020). Evaluation of pushbroom DAP relative to frame camera DAP and lidar for forest modeling. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 237, Article 111535. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111535>
- Sys, C., Van Ranst, E., & Debaveye, J. (1993). *Land Evaluation: Part III – Crop Requirements*. International Training Centre for Post-Graduate Soil Scientists, Ghent University.
- Tollenaar, M., & Lee, E. A. (2011). Strategies for enhancing grain yield in maize. In *Plant Breeding Reviews* (Janick, J. ed., Vol. 34). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118061015.ch2>
- Torney, L., Weltzien, C., & Voß, S. (2025). Improving agricultural management zoning involving Sentinel-2 timeseries, crop's phenology stages and proximal soil sensing data.
- Upreti, D. C., Villano, L., Raviz, J., Laborte, A., Radanielson, A. M., & Nelson, K. M. (2025). Maize Yield Suitability Mapping in Two Major Asian Mega-Deltas Using AgERA and CMIP6 Climate Projections in Crop Modeling. *Agronomy*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy15040878>
- van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Titttonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Verburg, P. H., Neumann, K., & Nol, L. (2011). Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology*, 17(2), 974-989. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x>
- Wang, J., Wang, Y., Li, G., & Qi, Z. (2024). Integration of Remote Sensing and Machine Learning for Precision Agriculture: A Comprehensive Perspective on Applications. *AGRONOMY-BASEL*, 14(9), Article 1975. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091975>
- Yang, X., Li, Y., Zhang, M., Yan, H., Zhao, Y., & Yang, Q. (2017). Climate change impacts on maize productivity and agroecological suitability.
- Zabel, F., Putzenlechner, B., & Mauser, W. (2014). Global Agricultural Land Resources - A High Resolution Suitability Evaluation and Its Perspectives until 2100 under Climate Change Conditions. *PLOS ONE*, 9(9), Article e107522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107522>
- Zdunić, Z., Jambrović, A., Andrić, L., Galić, V., & Šimić, D. (2022). Choice of maize maturity group and climate change: current status and predictions. *Proceedings of the 57th Croatian & 17th International Symposium on Agriculture*, 50-58.

ANEXOS

Anexo I - Distribuição espacial anual da cultura do milho na área de estudo, estimada por detecção remota, no período 2017–2025.



Anexo II - Área anual ocupada pela cultura do milho na área de estudo, estimada por deteção remota, por concelho, no período 2017–2025 (hectares).

Conselho Anos	Barcelos	Esposende	Maia	Matosinhos	Póvoa de Varzim	Santo Tirso	Trofa	Viana do Castelo	Vila do conde	Vila Nova de Famalicão	Total
2017	6814	911	781	585	2040	680	959	576	5040	2752	21138
2018	7025	983	833	642	2125	731	944	626	5080	2842	21831
2019	6931	978	868	648	2069	737	974	630	5064	2908	21807
2020	6997	987	852	631	2053	713	982	627	5127	2909	21878
2021	7077	1003	884	654	2122	731	999	654	5138	2956	22218
2022	6825	965	793	577	2124	667	940	626	5092	2731	21340
2023	7014	972	762	594	2120	694	952	684	5121	2857	21770
2024	7156	971	800	645	2132	753	1003	635	5145	3028	22268
2025	6697	919	786	568	1988	633	923	597	5035	2644	20790
Total	62536	8689	7359	5544	18773	6339	8676	5655	45842	25627	

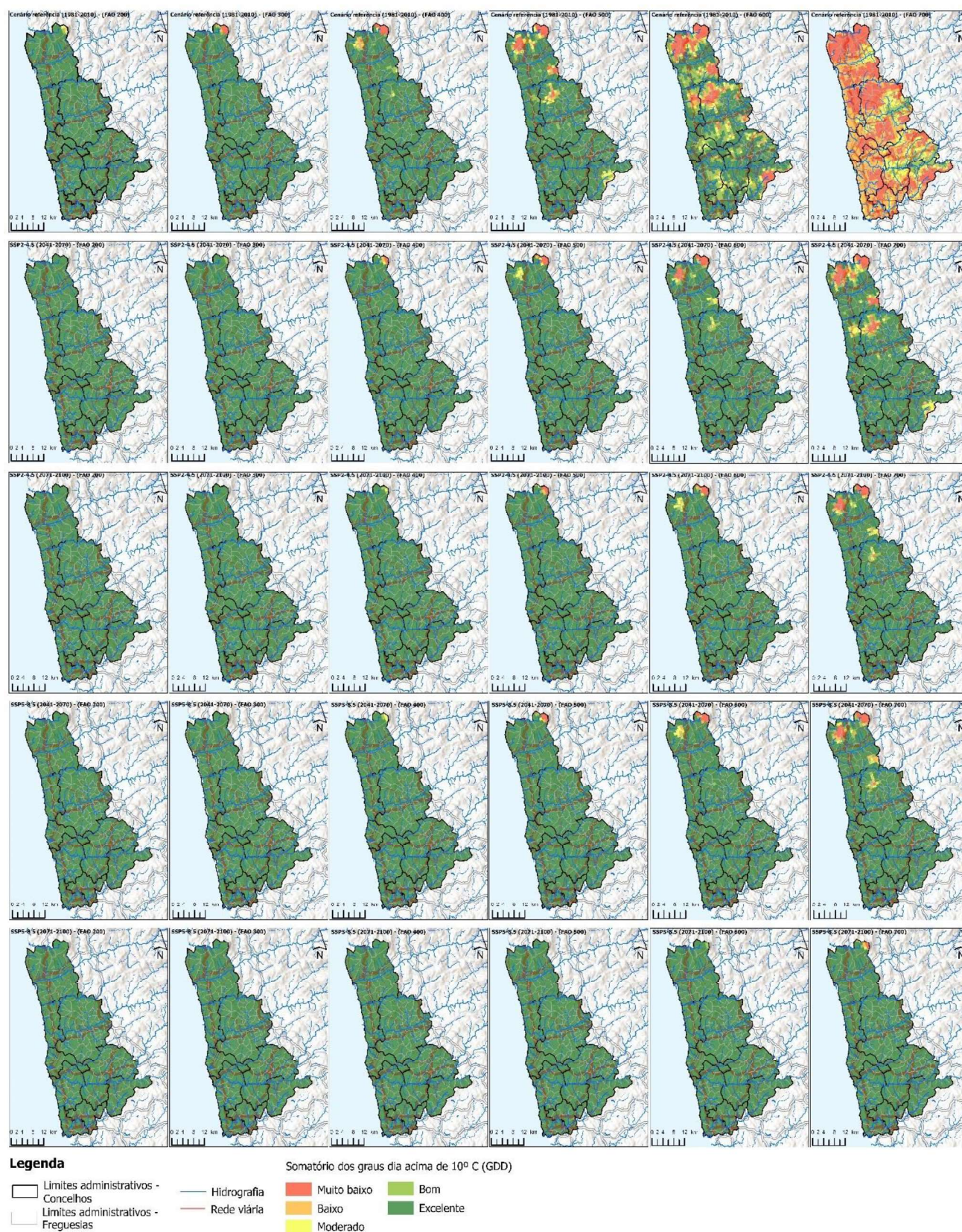
Conselho Anos	Barcelos	Esposende	Maia	Matosinhos	Póvoa de Varzim	Santo Tirso	Trofa	Viana do Castelo	Vila do conde	Vila Nova de Famalicão	Total
2017	6427	1083	751	567	1759	666	852	990	4628	2516	20239
2018	6380	1059	757	559	1731	646	842	977	4638	2497	20088
2019	6292	997	742	523	1713	629	825	917	4652	2460	19750
2020	6229	960	723	514	1701	585	807	882	4644	2376	19420
2021	6175	951	708	512	1697	575	807	836	4678	2367	19307
2022	6145	942	718	504	1688	570	793	848	4512	2329	19048
2023	6034	887	706	495	1643	565	772	747	4550	2322	18721
2024	5930	854	709	496	1657	541	757	688	4574	2319	18525
2025	5883	826	699	491	1662	517	768	636	4607	2335	18424
Total	55498	8560	6512	4661	15251	5294	7225	7520	41482	21521	

Anexo III - Área anual de milho declarada no Pedido Único (PU), por concelho, na área de estudo, no período 2017–2025 (hectares)

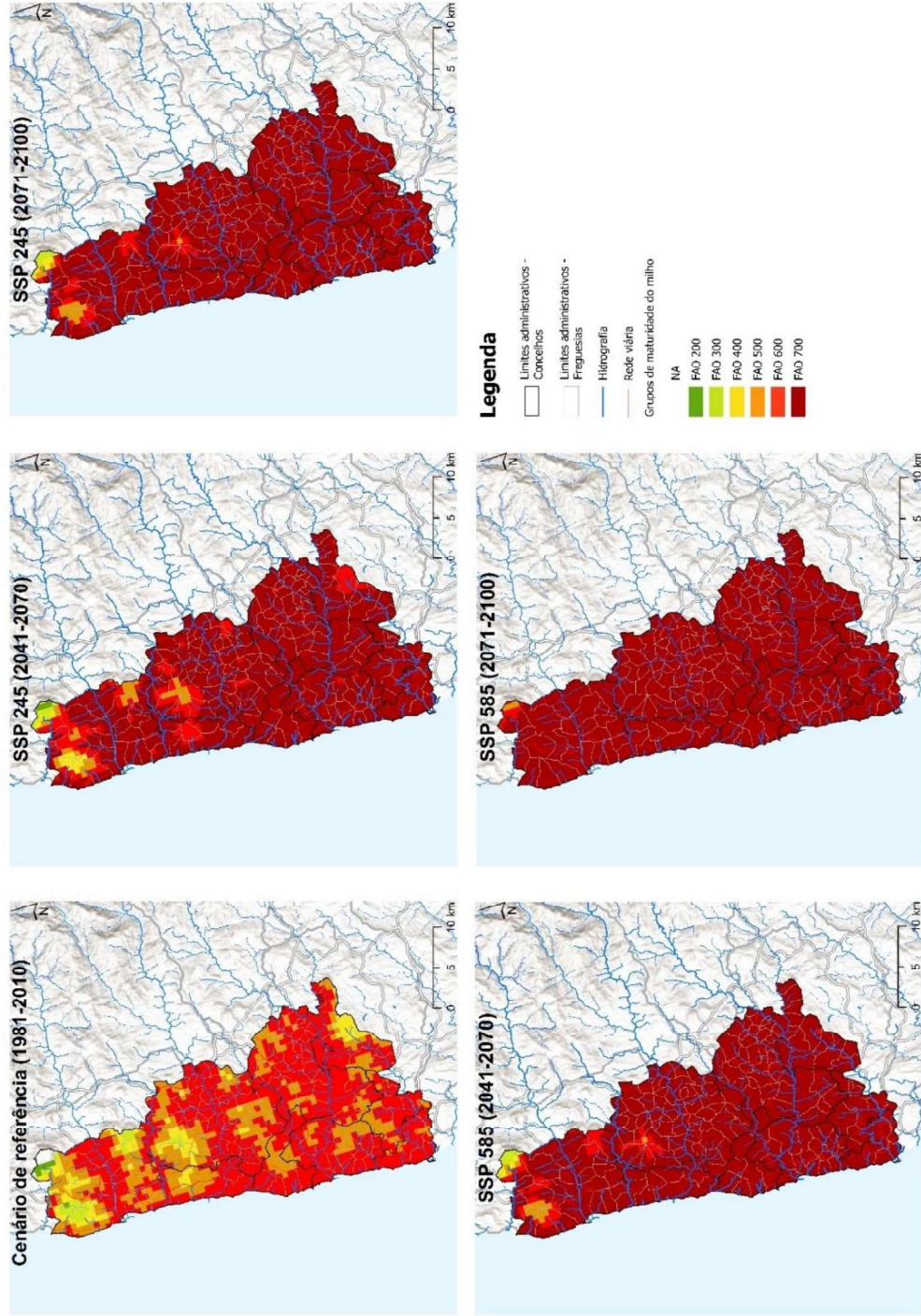
Anexo IV - Diferença anual entre a área de milho estimada por deteção remota e a área declarada no Pedido Único (PU), por concelho, no período 2017–2025 (hectares).

Conselho Anos	Barcelos	Esposende	Maia	Matosinhos	Póvoa de Varzim	Santo Tirso	Trofa	Viana do Castelo	Vila do conde	Vila Nova de Famalicão	Total
2017	387	-172	30	18	281	14	107	-414	412	236	899
2018	645	-76	76	83	394	85	102	-351	442	345	1743
2019	639	-19	126	125	356	108	149	-287	412	448	2057
2020	768	27	129	117	352	128	175	-255	483	533	2458
2021	902	52	176	142	425	156	192	-182	460	589	2911
2022	680	23	75	73	436	97	147	-222	580	402	2292
2023	980	85	56	99	477	129	180	-63	571	535	3049
2024	1226	117	91	149	475	212	246	-53	571	709	3743
2025	814	93	87	77	326	116	155	-39	428	309	2366
Total	7038	129	847	883	3522	1045	1451	-1865	4360	4106	

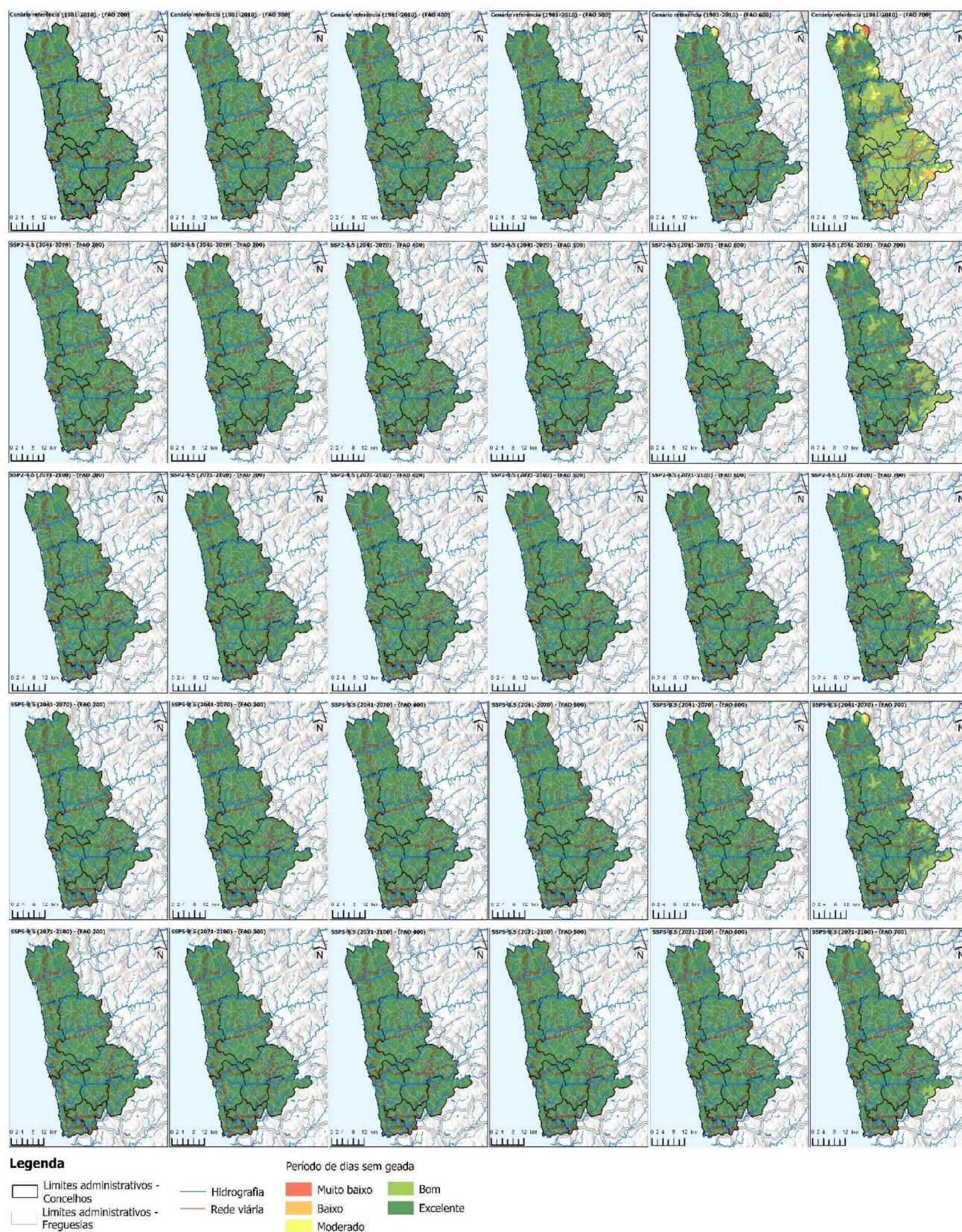
Anexo V - Graus-dia acumulados (GDD > 10 °C) para diferentes grupos FAO (200–700), no cenário climatológico de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para os períodos 2041–2070 e 2071–2100.



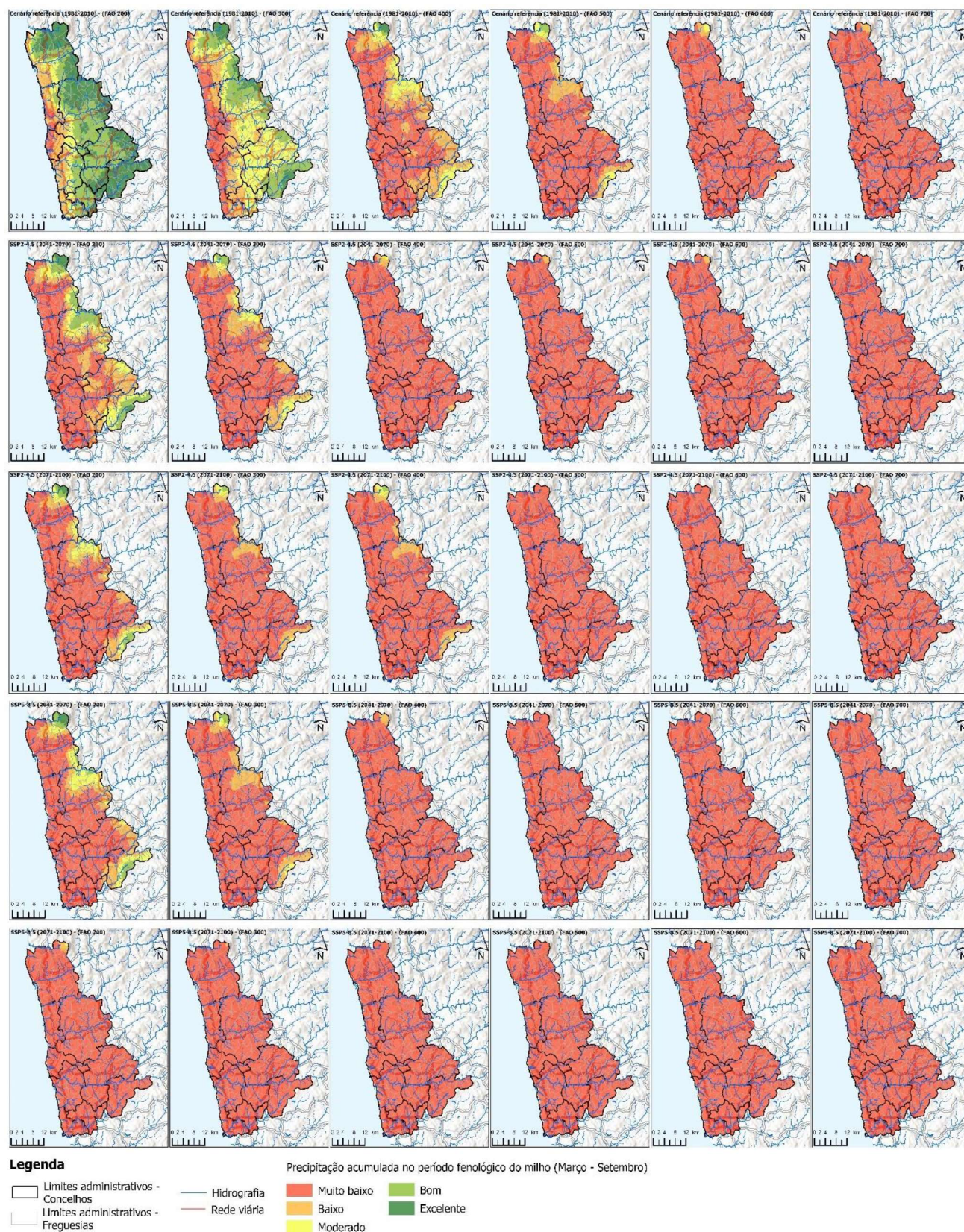
Anexo VI Distribuição espacial dos grupos de maturação FAO do milho, estimados a partir dos graus-dia acumulados ($GDD > 10^{\circ}C$), no cenário climático de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos 2041–2070 e 2071–2100.



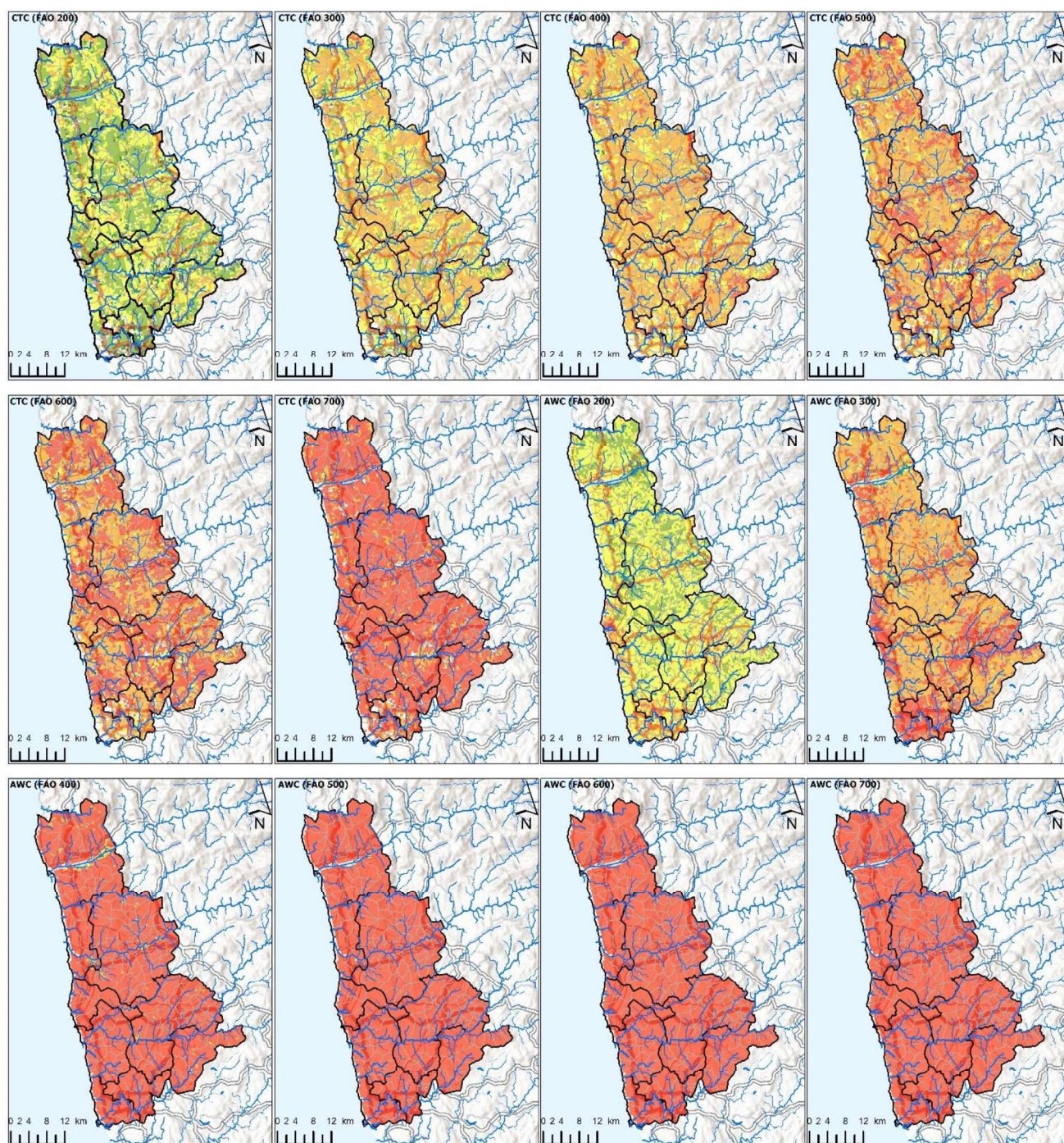
Anexo VII - Número de dias sem geada para diferentes grupos FAO (200–700), no cenário climatológico de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para os períodos 2041–2070 e 2071–2100.



Anexo VIII - Precipitação acumulada no período fenológico do milho (março a setembro) para diferentes grupos FAO (200–700), no período de referência (1981–2010) e nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para os períodos 2041–2070 e 2071–2100.



Anexo IX - Indicadores edáficos para o cultivo de milho, expressos pela capacidade de troca catiónica (CTC) e pela capacidade de água disponível (AWC), para diferentes grupos FAO (200–700).



Legenda

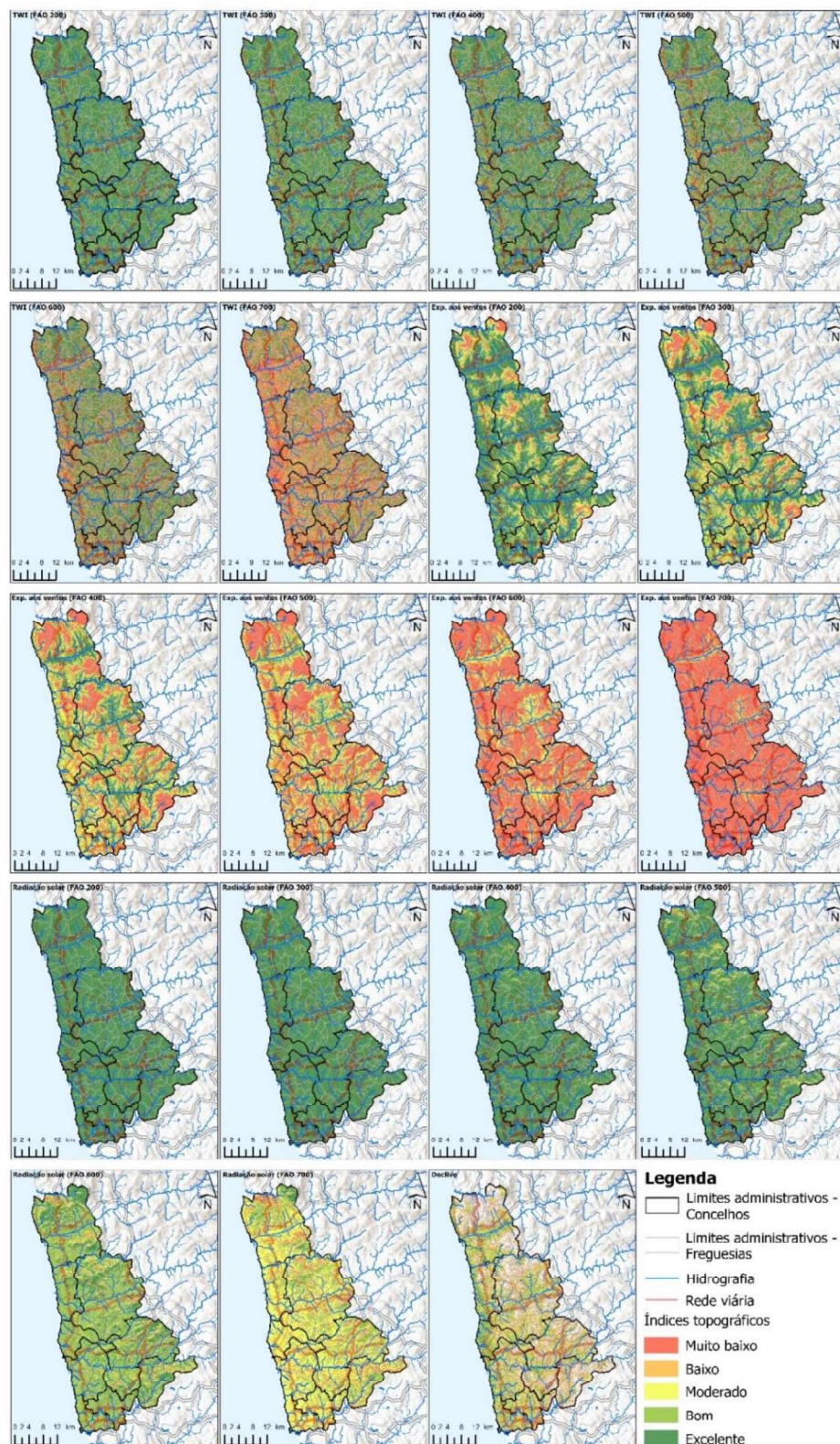
- Limites administrativos - Concelhos
- Limites administrativos - Freguesias

- Hidrografia
- Rede viária

Indicadores edáficos

- Muito baixo
- Baixo
- Moderado
- Bom
- Excelente

Anexo X - Índices topográficos e climáticos locais (TWI, exposição ao vento, radiação solar e declive) para diferentes grupos FAO (200–700).



Anexo XI - Aptidão agroecológica do milho no Cenário de referência (1981-2010)



Figura A11.1. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 200 no cenário climatológico de referência (1981–2010).



Figura A11.2. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 300 no cenário climatológico de referência (1981–2010).

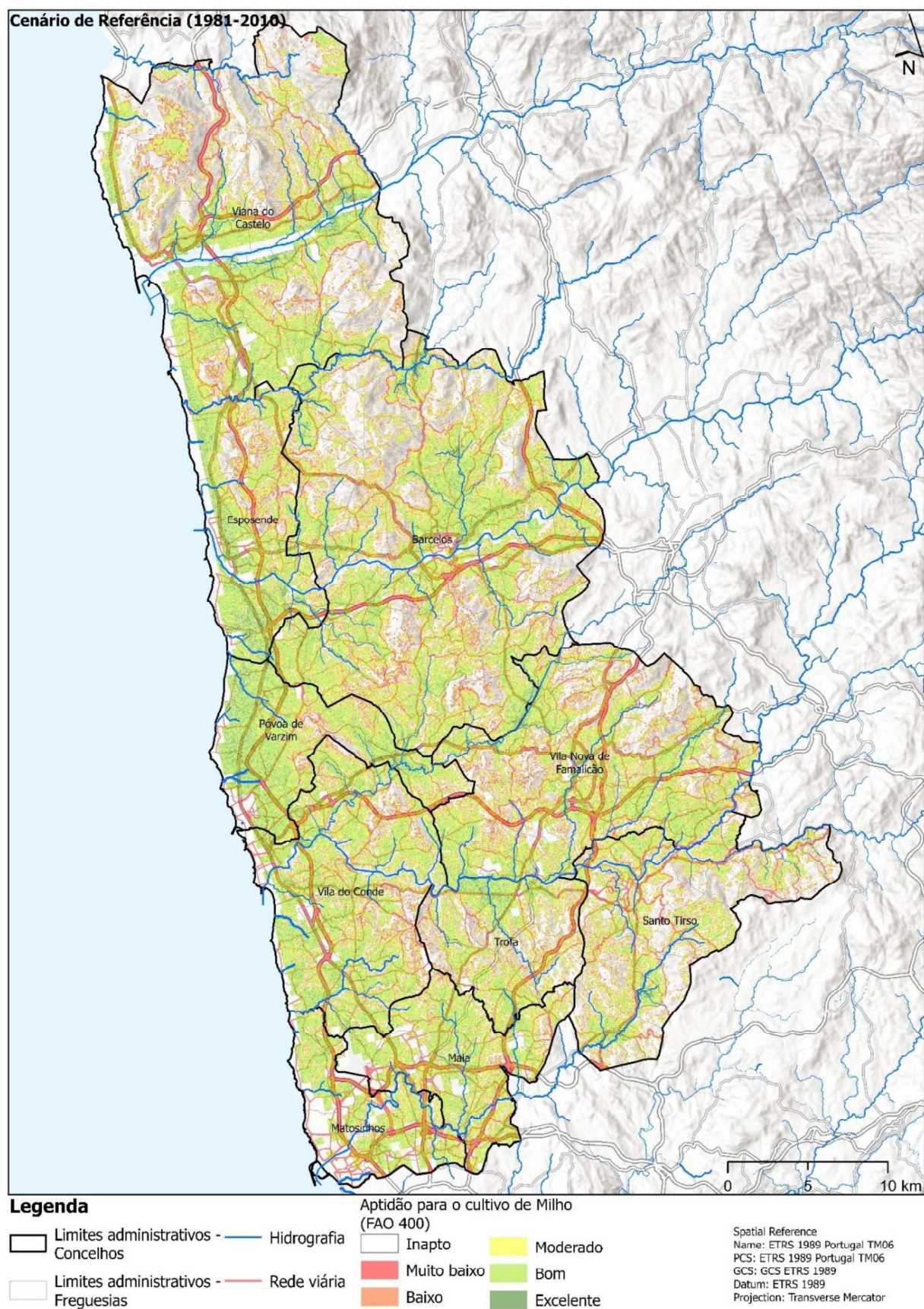


Figura A11.3. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 400 no cenário climatológico de referência (1981–2010).

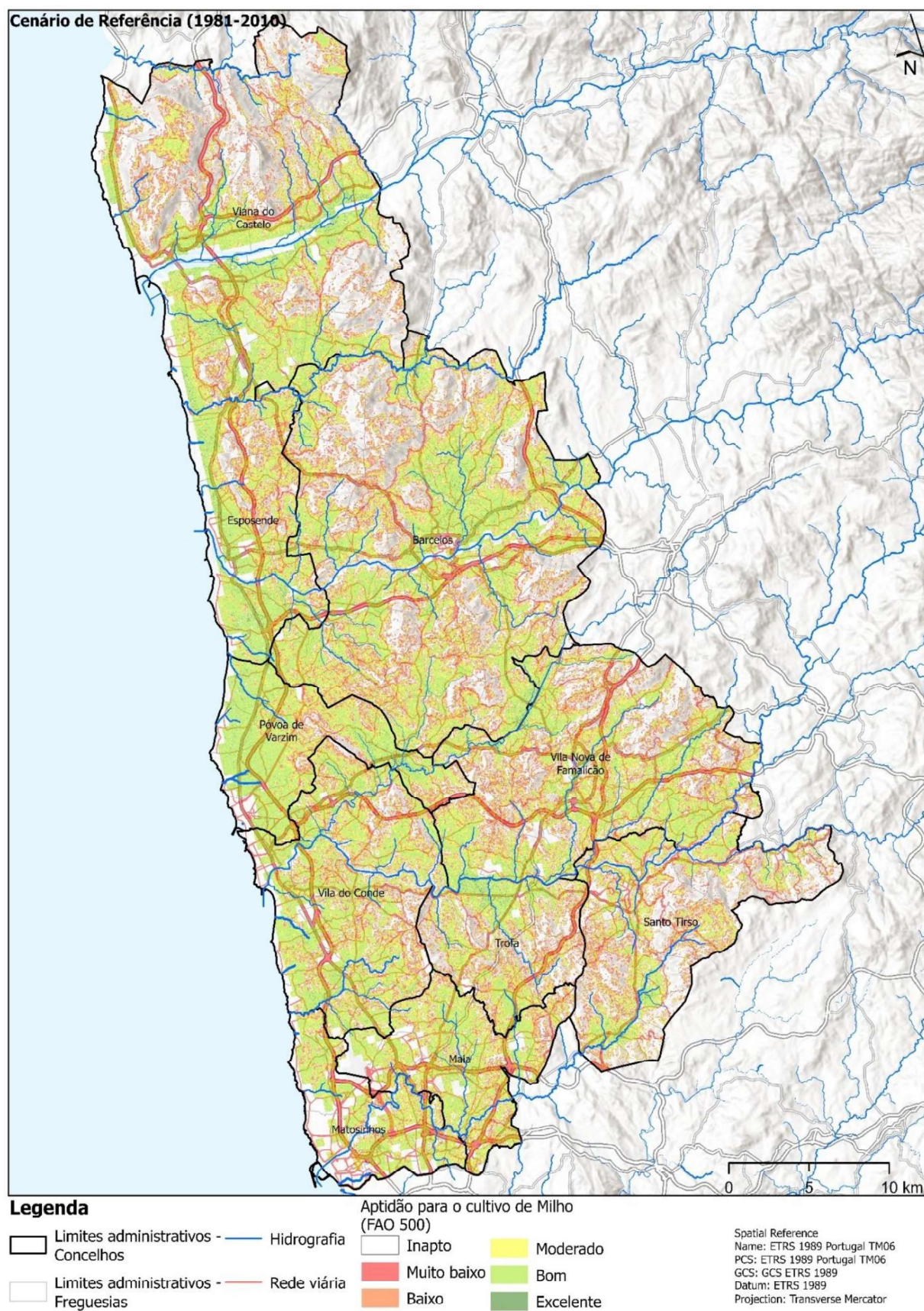


Figura A11.4. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 500 no cenário climatológico de referência (1981–2010).

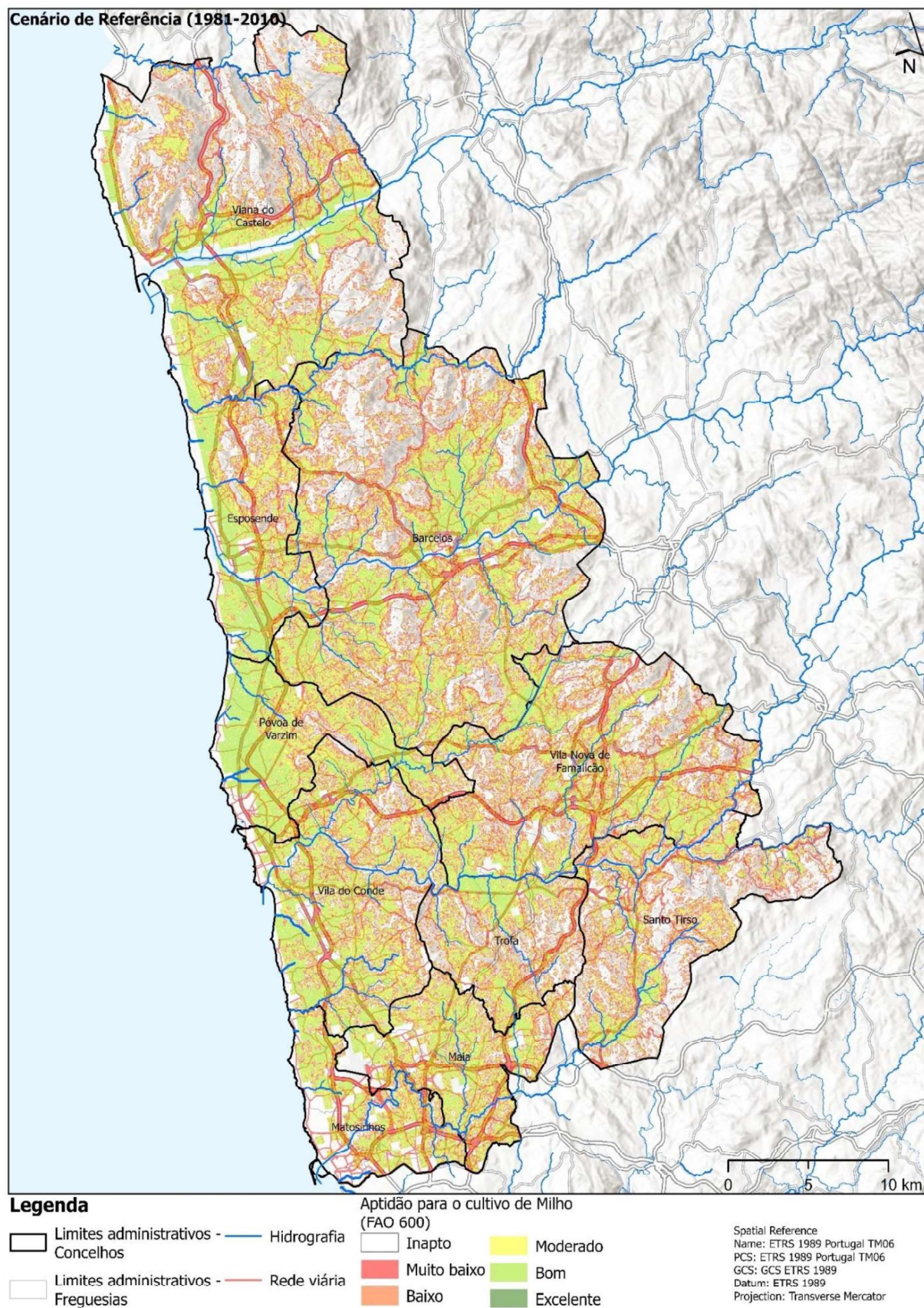


Figura A11.5. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 600 no cenário climático de referência (1981–2010).

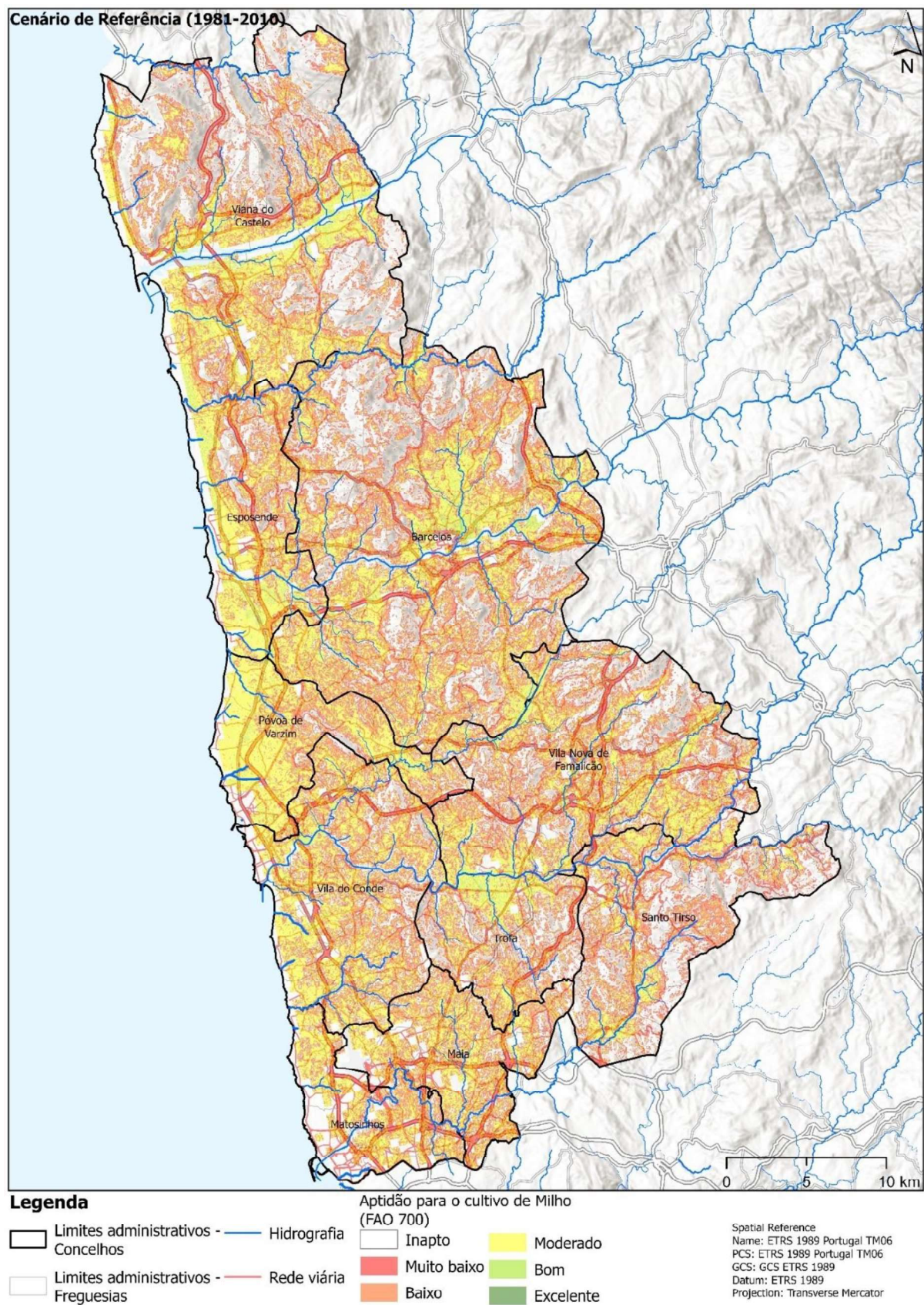


Figura A11.6. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 700 no cenário climatológico de referência (1981–2010).

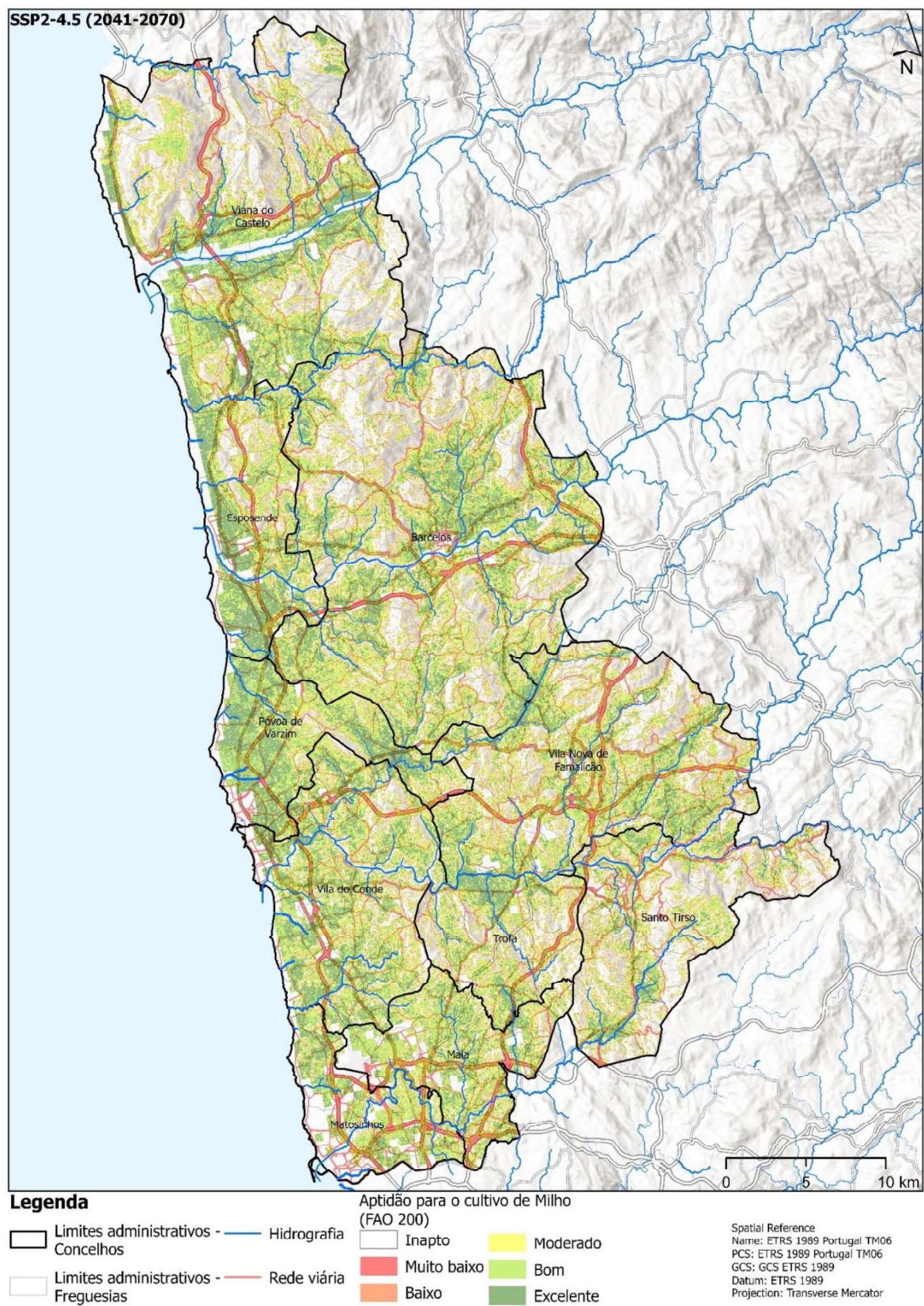


Figura A12.1. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 200 no cenário SSP2-4.5 (2041–2070).

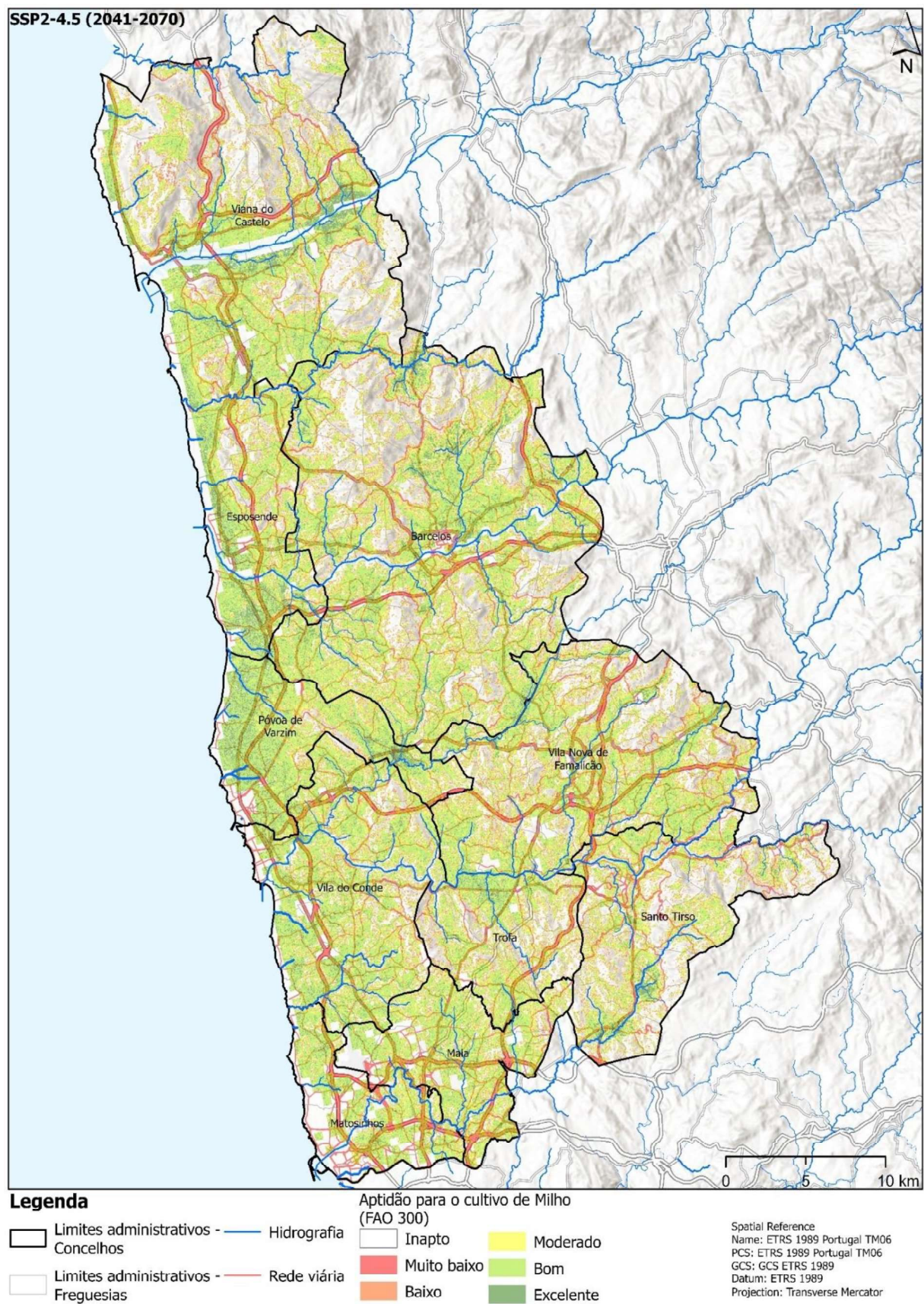


Figura A12.2. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 300 no cenário SSP2-4.5 (2041–2070).

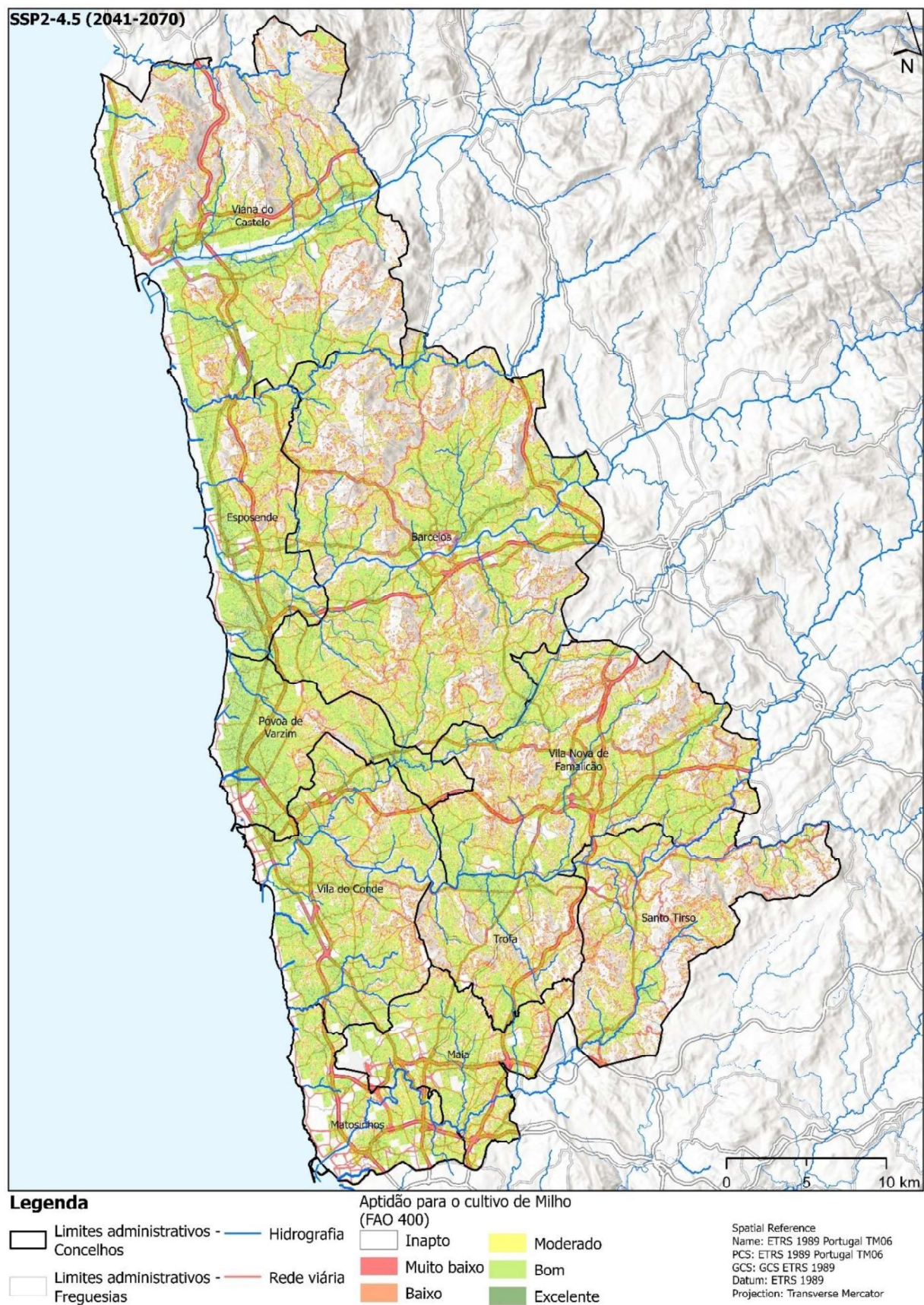


Figura A12.3. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 400 no cenário SSP2-4.5 (2041–2070).

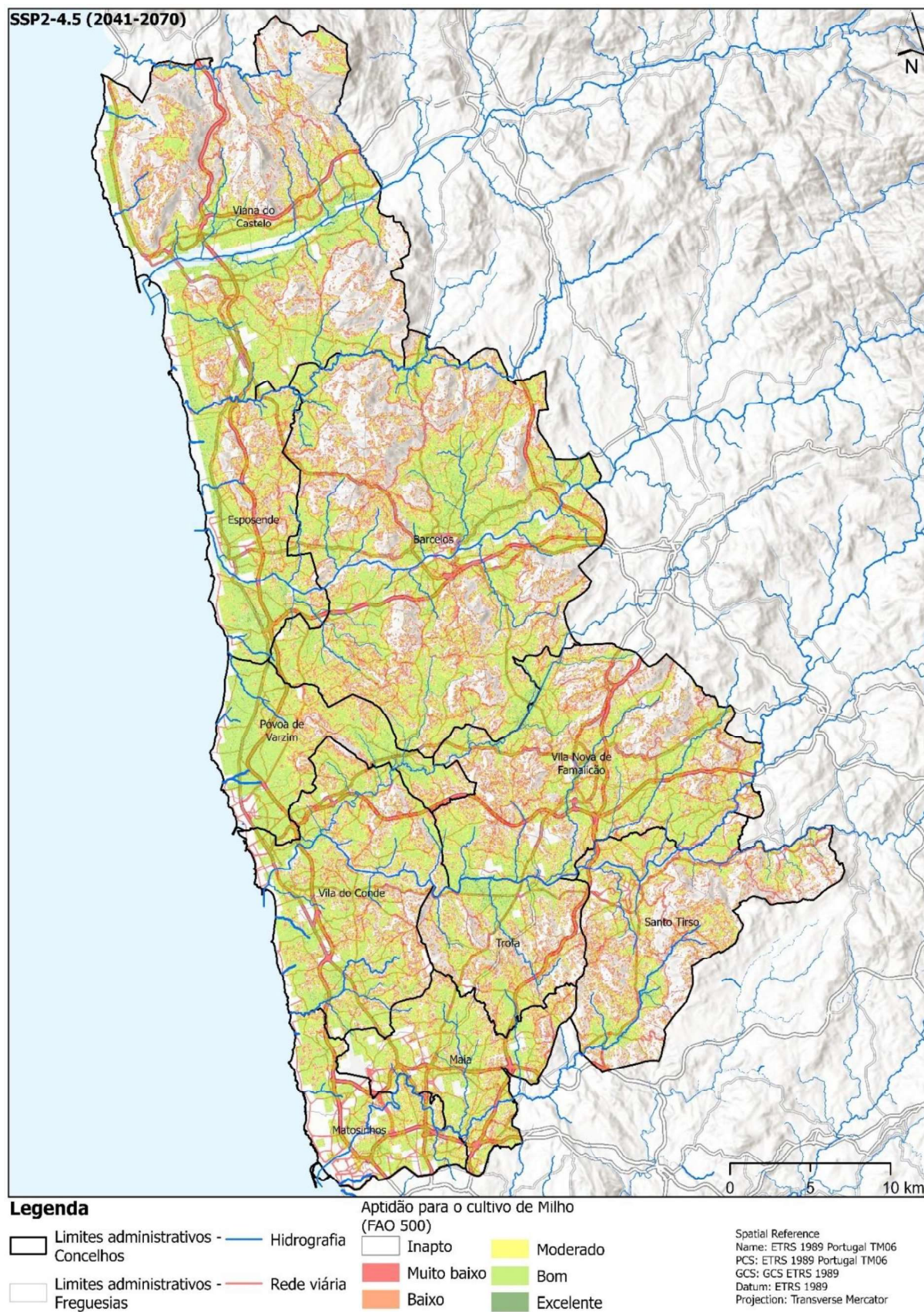


Figura A12.4 Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 500 no cenário SSP2-4.5 (2041–2070).

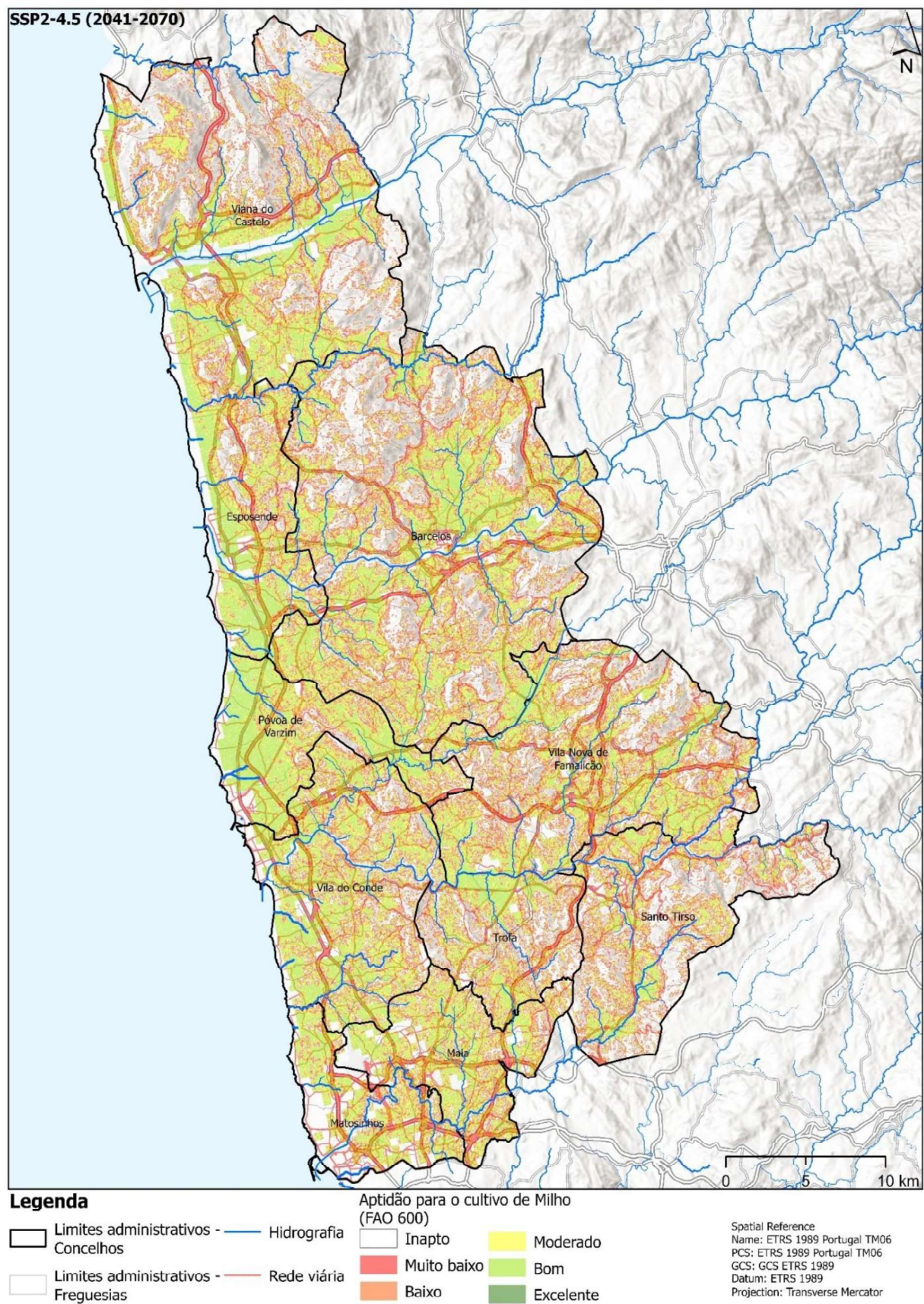


Figura A12.5. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 600 no cenário SSP2-4.5 (2041–2070).

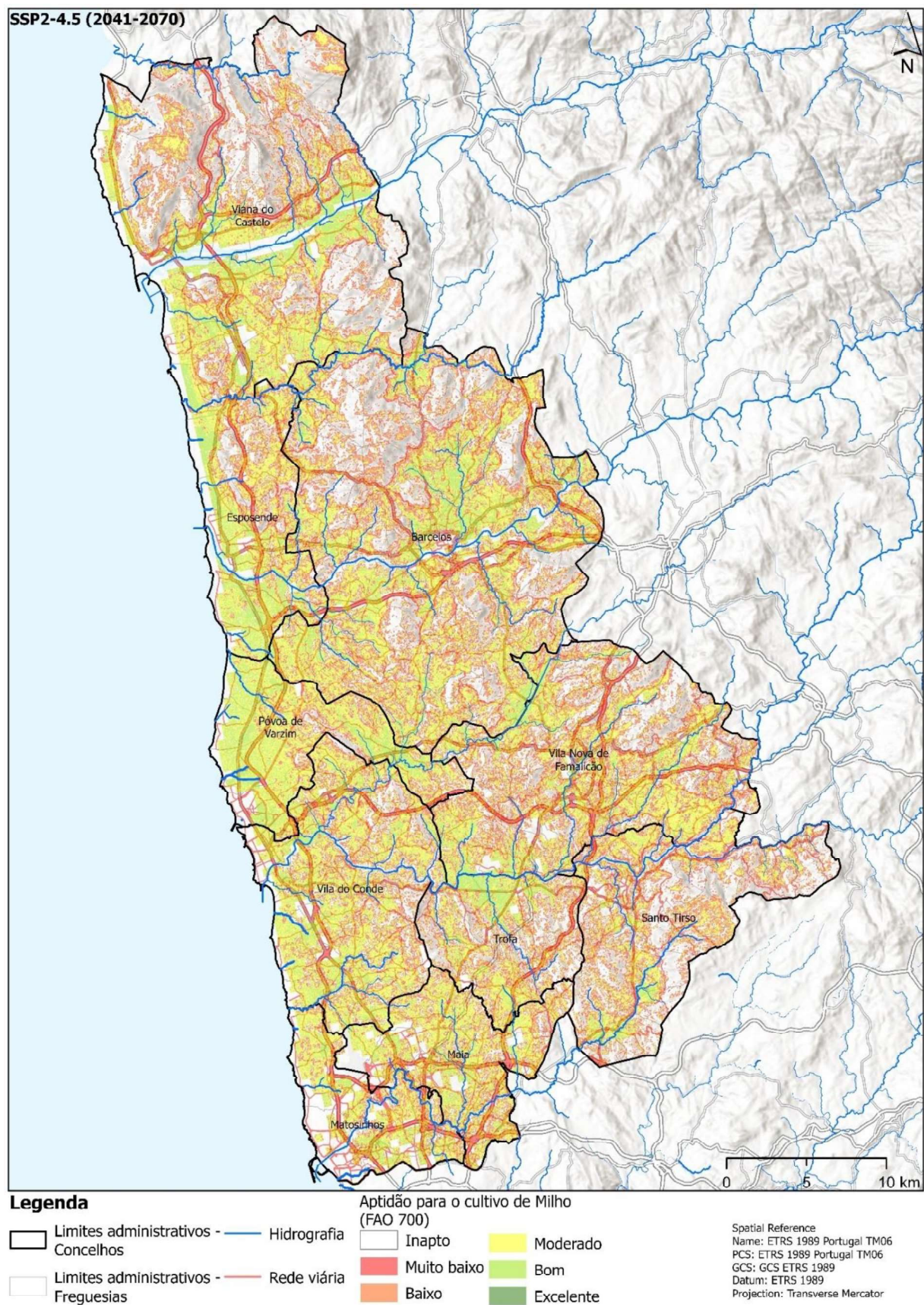


Figura A7.6. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 700 no cenário SSP2-4.5 (2041–2070).

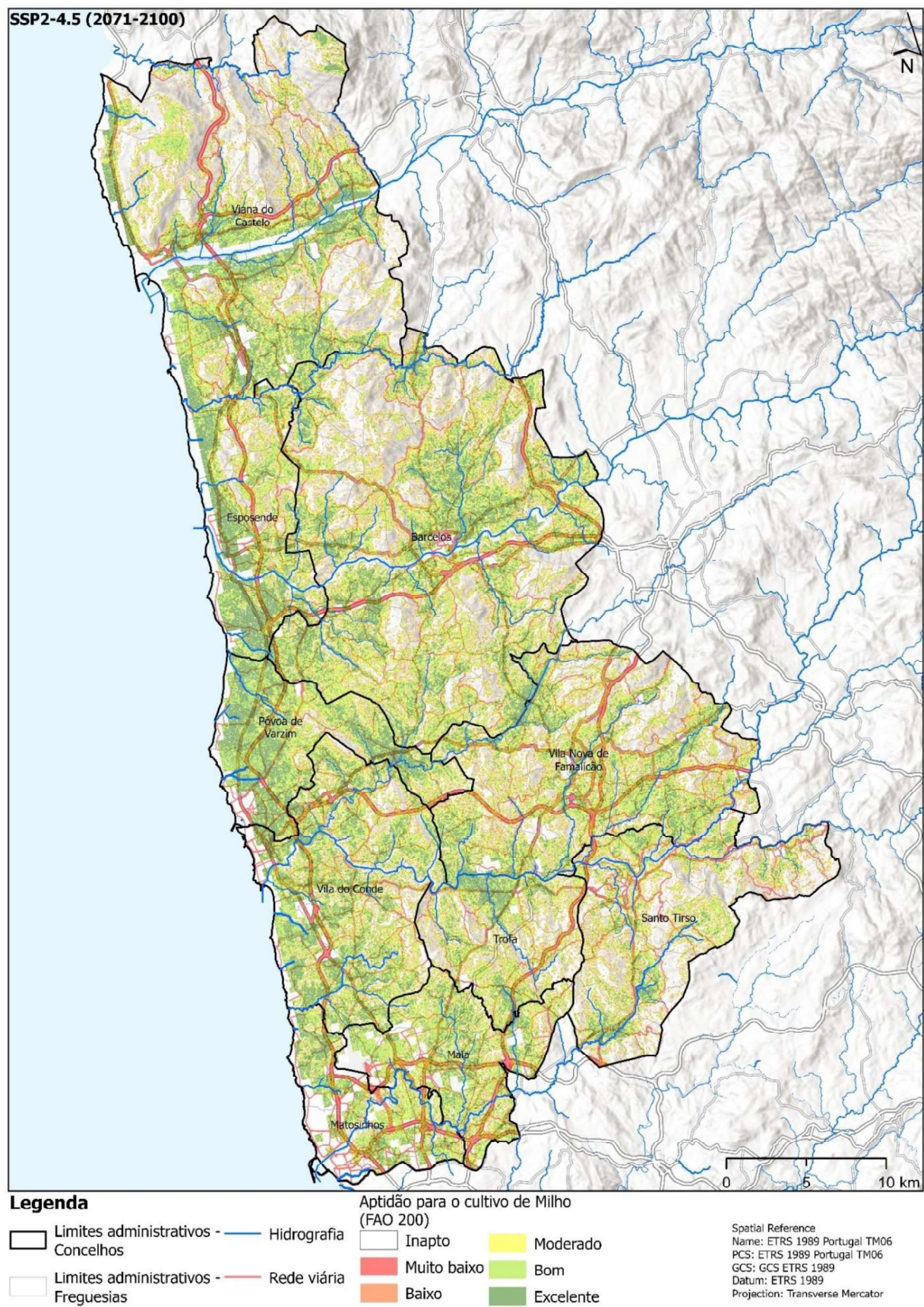


Figura A12.7 Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 200 no cenário SSP2-4.5 (2071–2100).

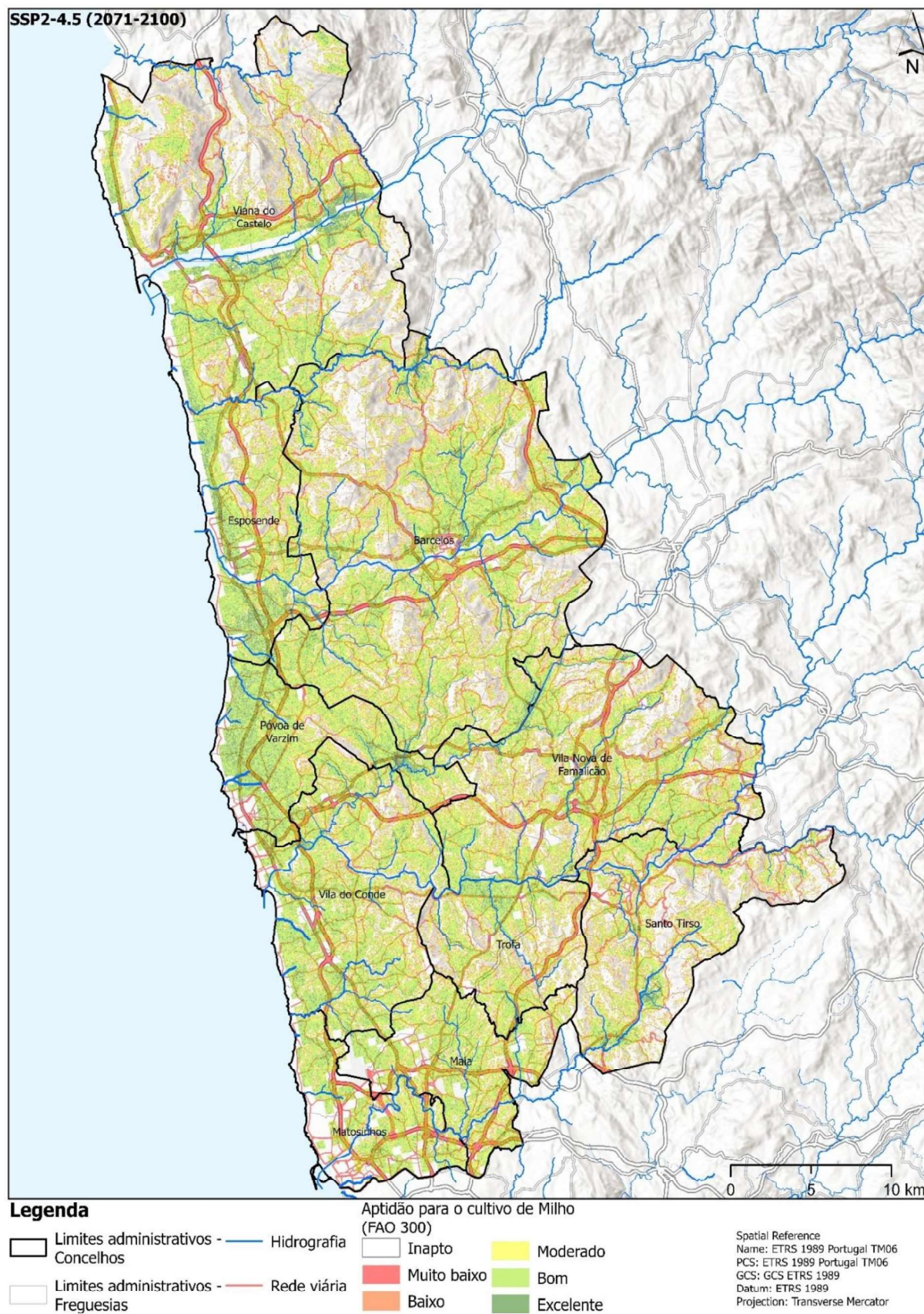


Figura A12.8. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 300 no cenário SSP2-4.5 (2071–2100).

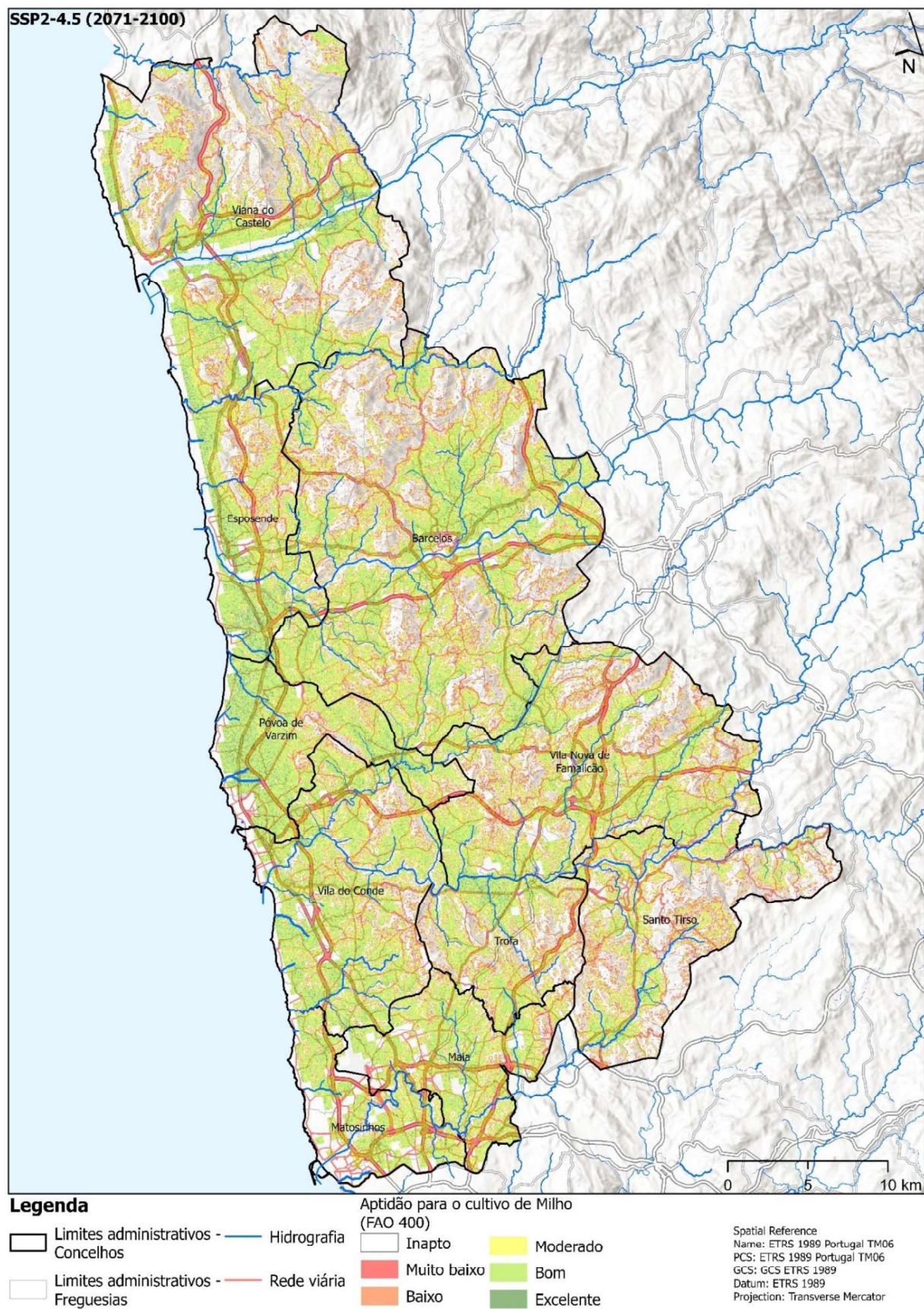


Figura A12.9 Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 400 no cenário SSP2-4.5 (2071–2100).

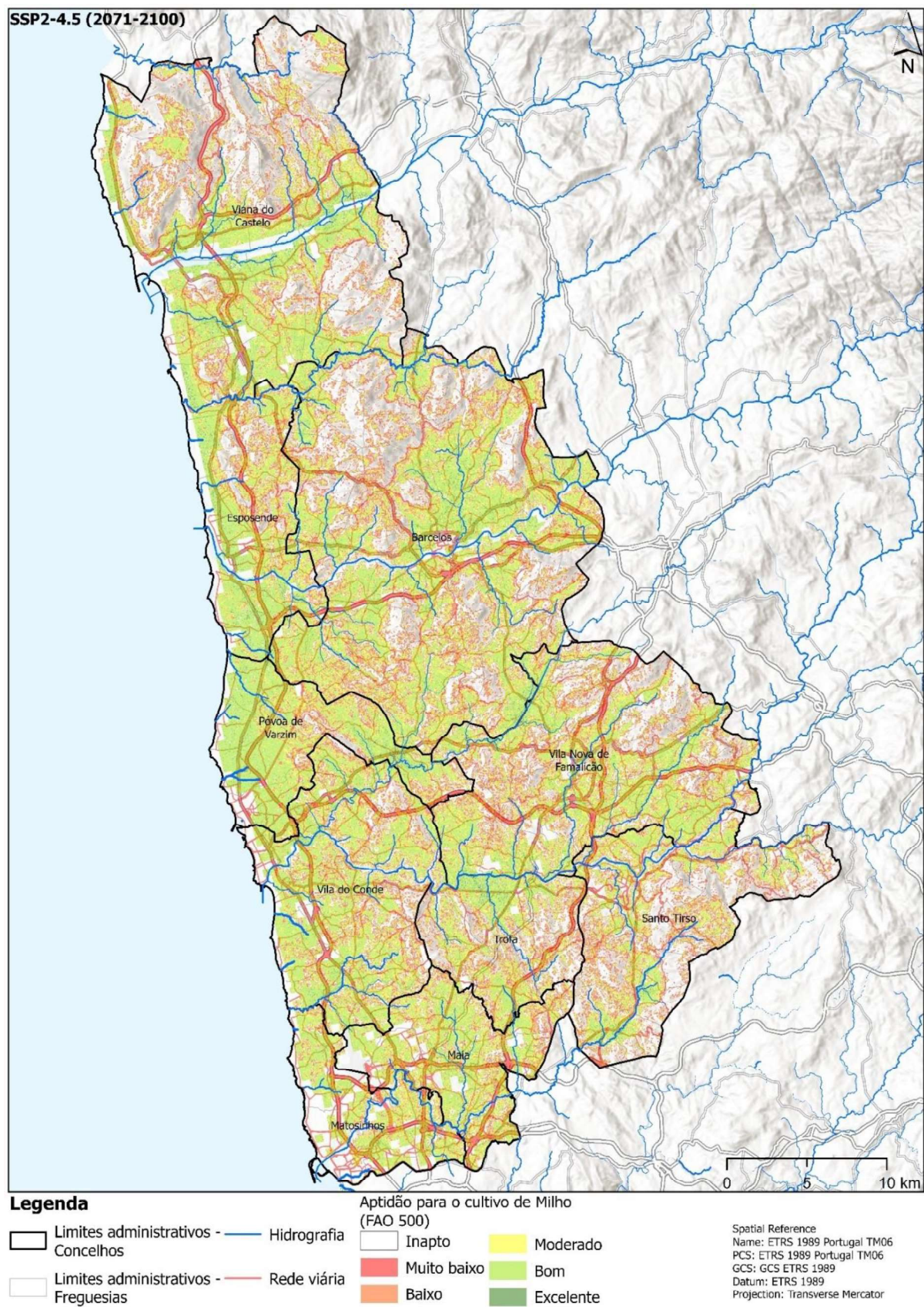


Figura A12.10 Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 500 no cenário SSP2-4.5 (2071–2100).

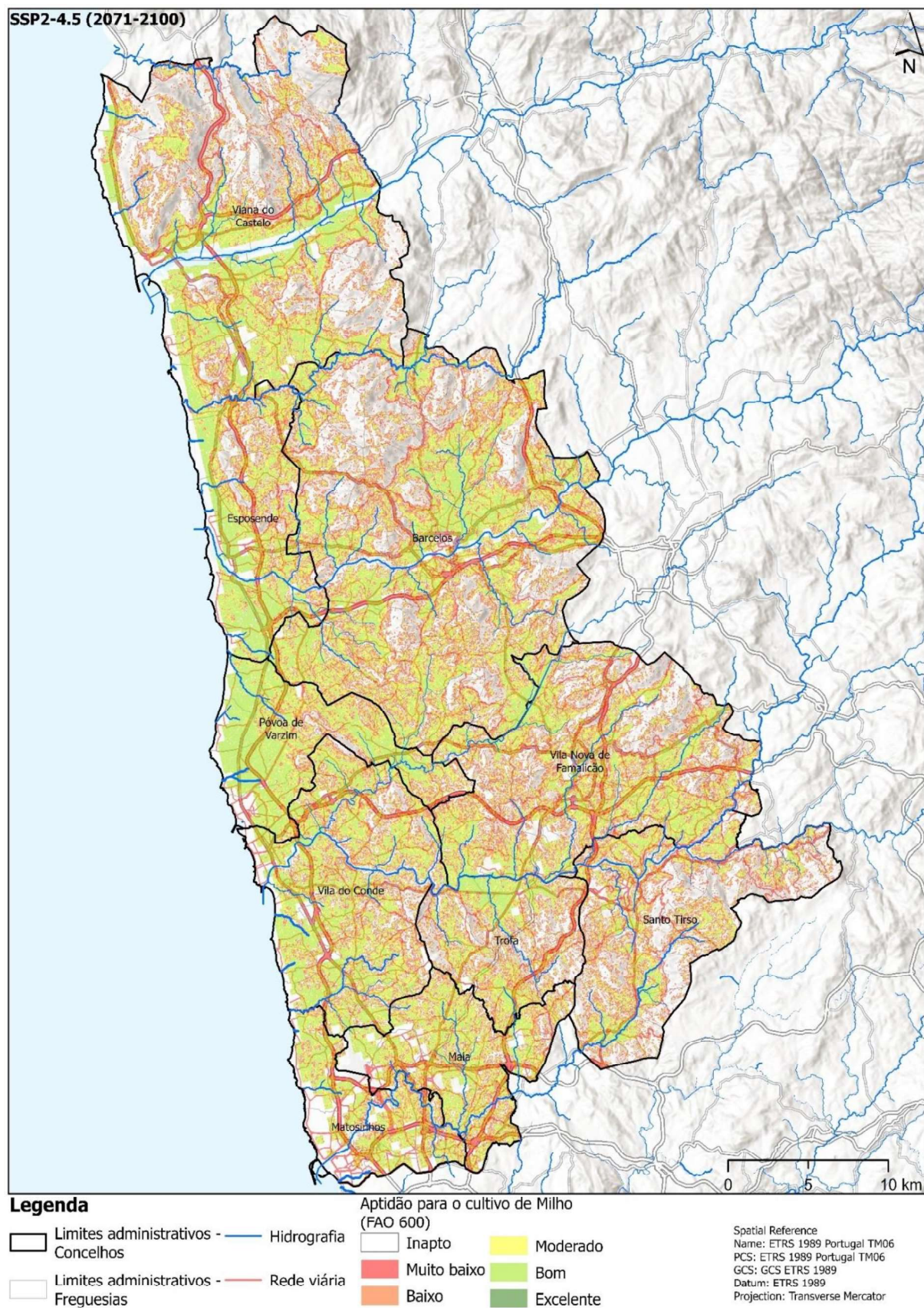


Figura A12.11 Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 600 no cenário SSP2-4.5 (2071–2100).

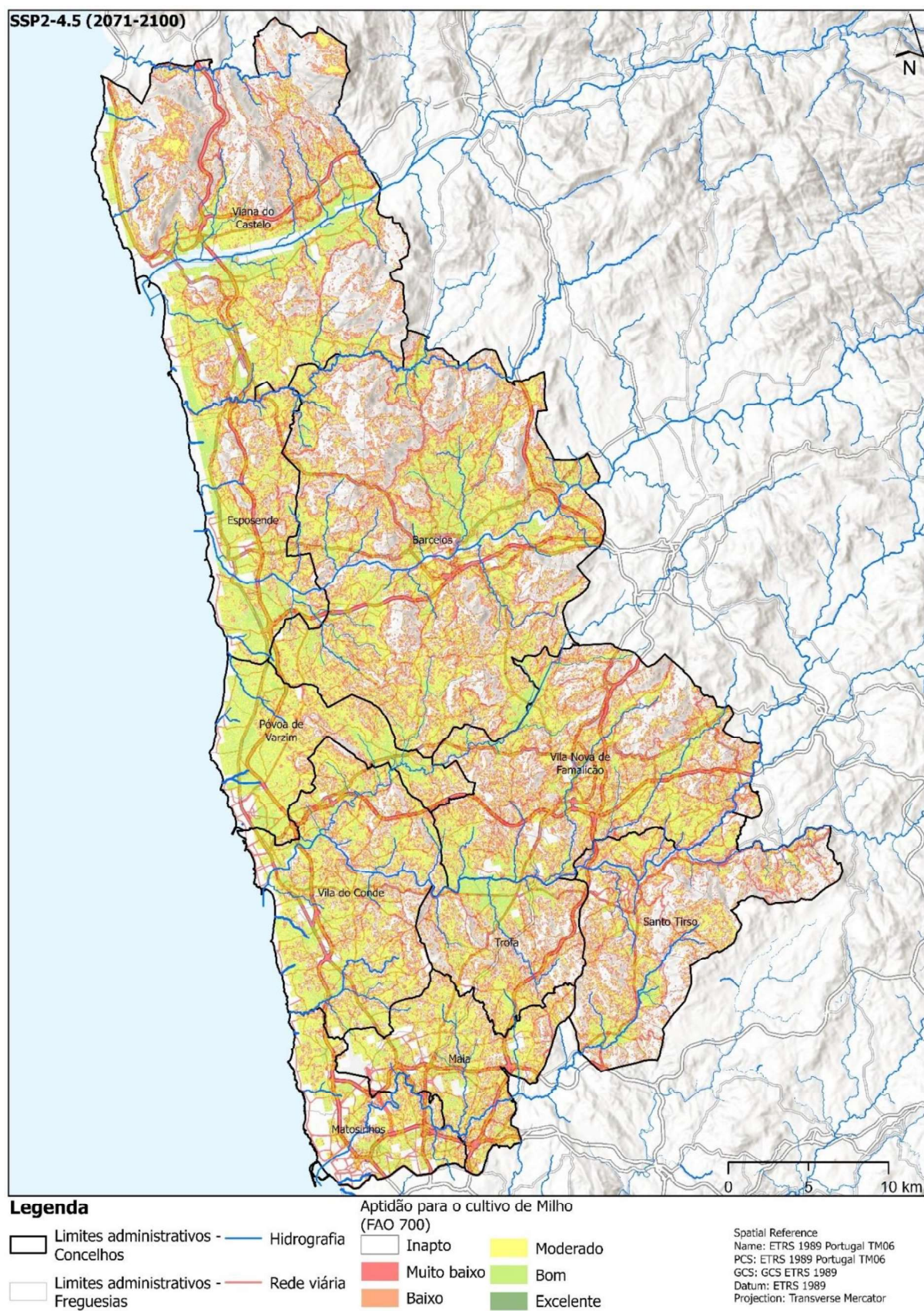


Figura A12.12 Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 700 no cenário SSP2-4.5 (2071–2100).

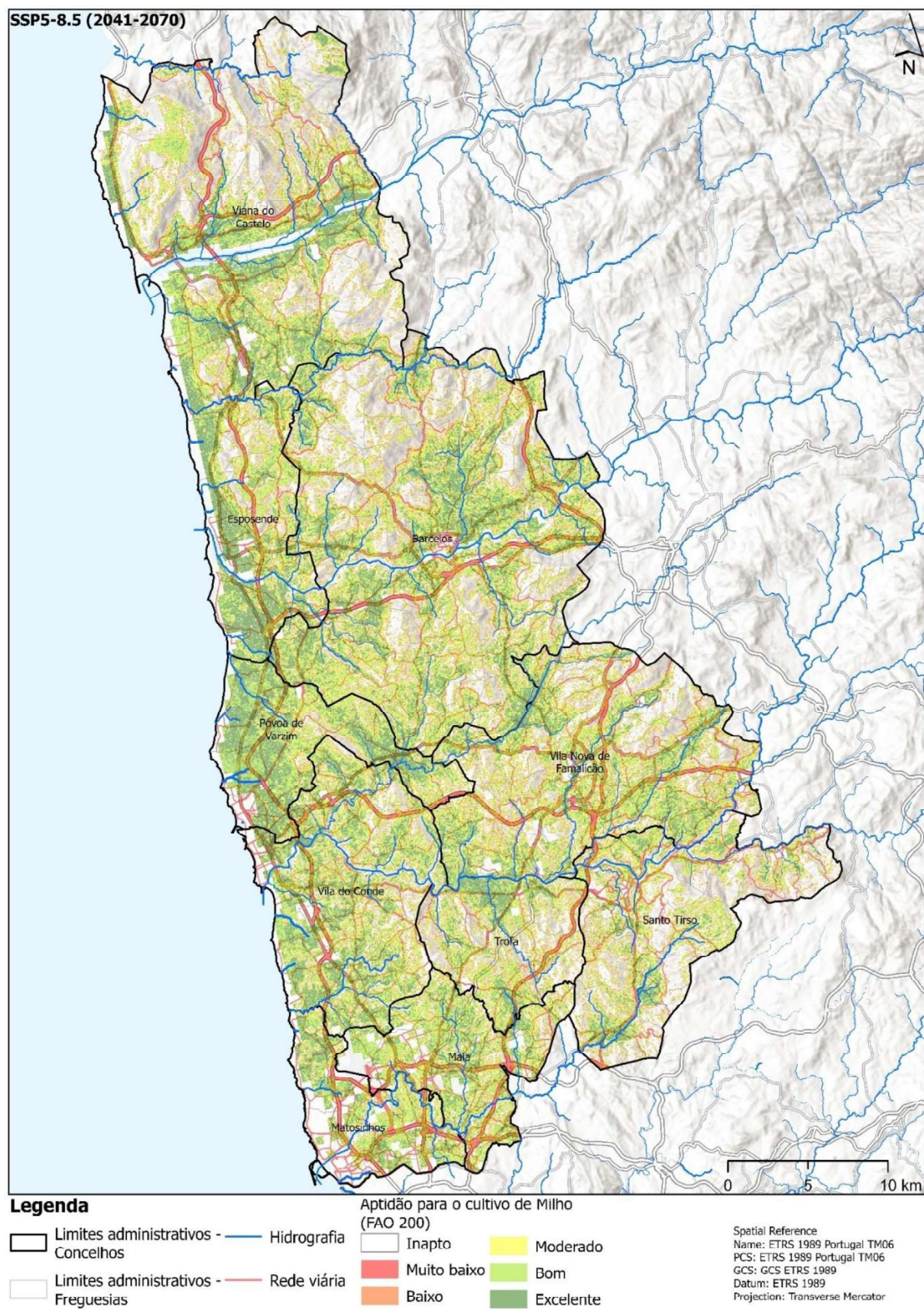


Figura A13.1. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 200 no cenário SSP5-8.5 para o período 2041–2070.



Figura A13.2 Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 300 no cenário SSP5-8.5 para o período 2041–2070.

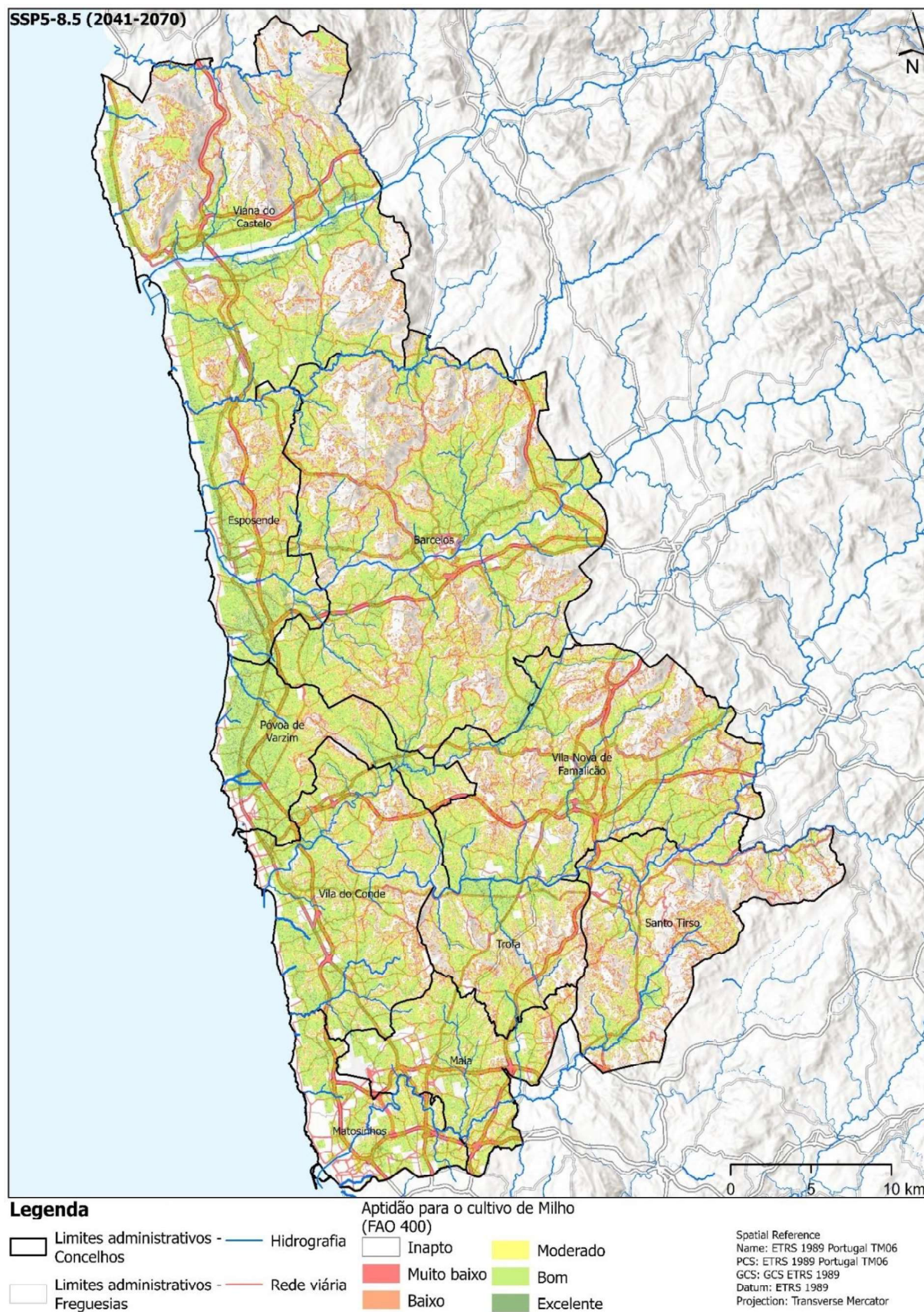


Figura A13.3 Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 400 no cenário SSP5-8.5 para o período 2041–2070.

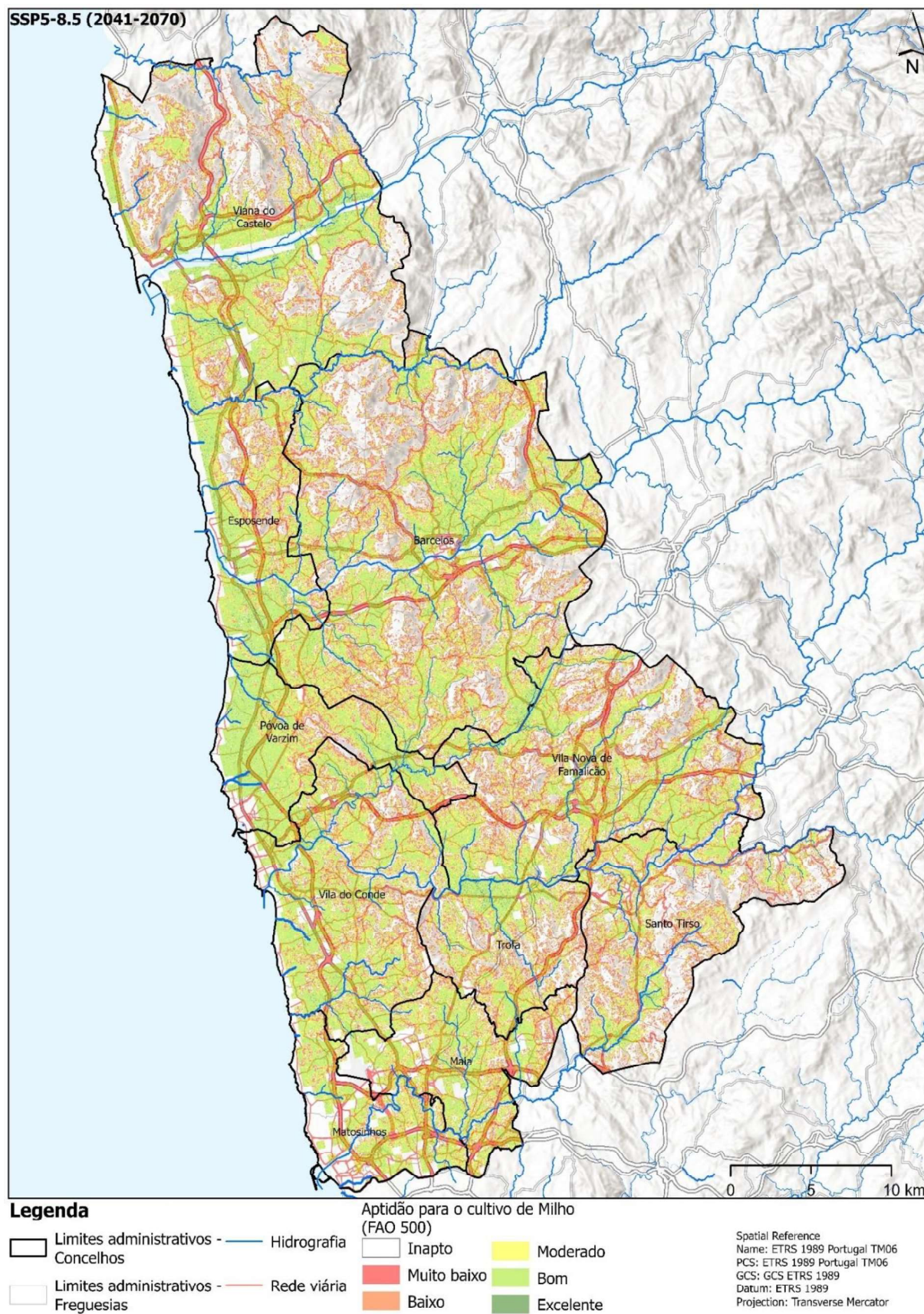


Figura A13.4. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 500 no cenário SSP5-8.5 para o período 2041–2070.

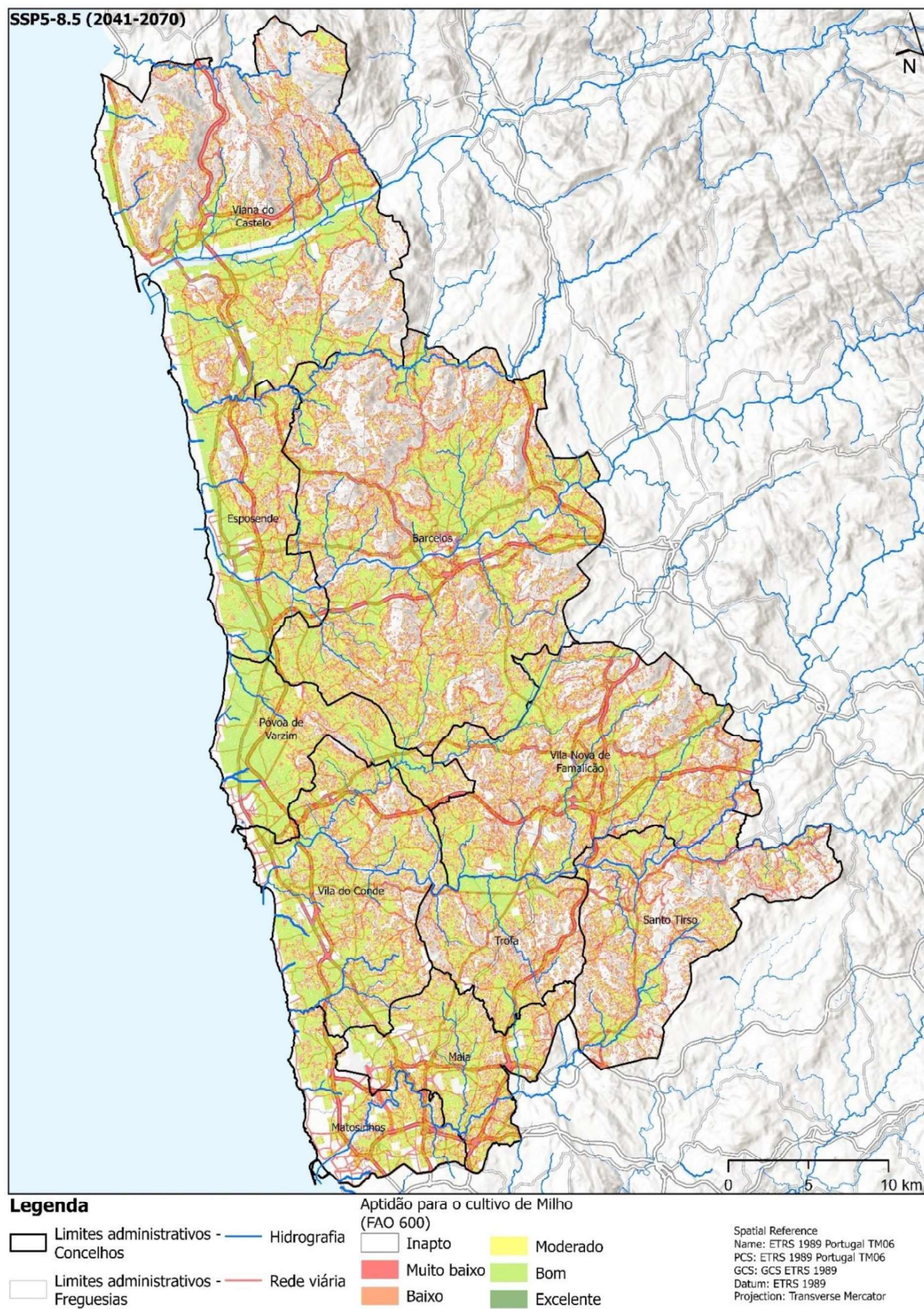


Figura A13.5. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 600 no cenário SSP5-8.5 para o período 2041–2070.

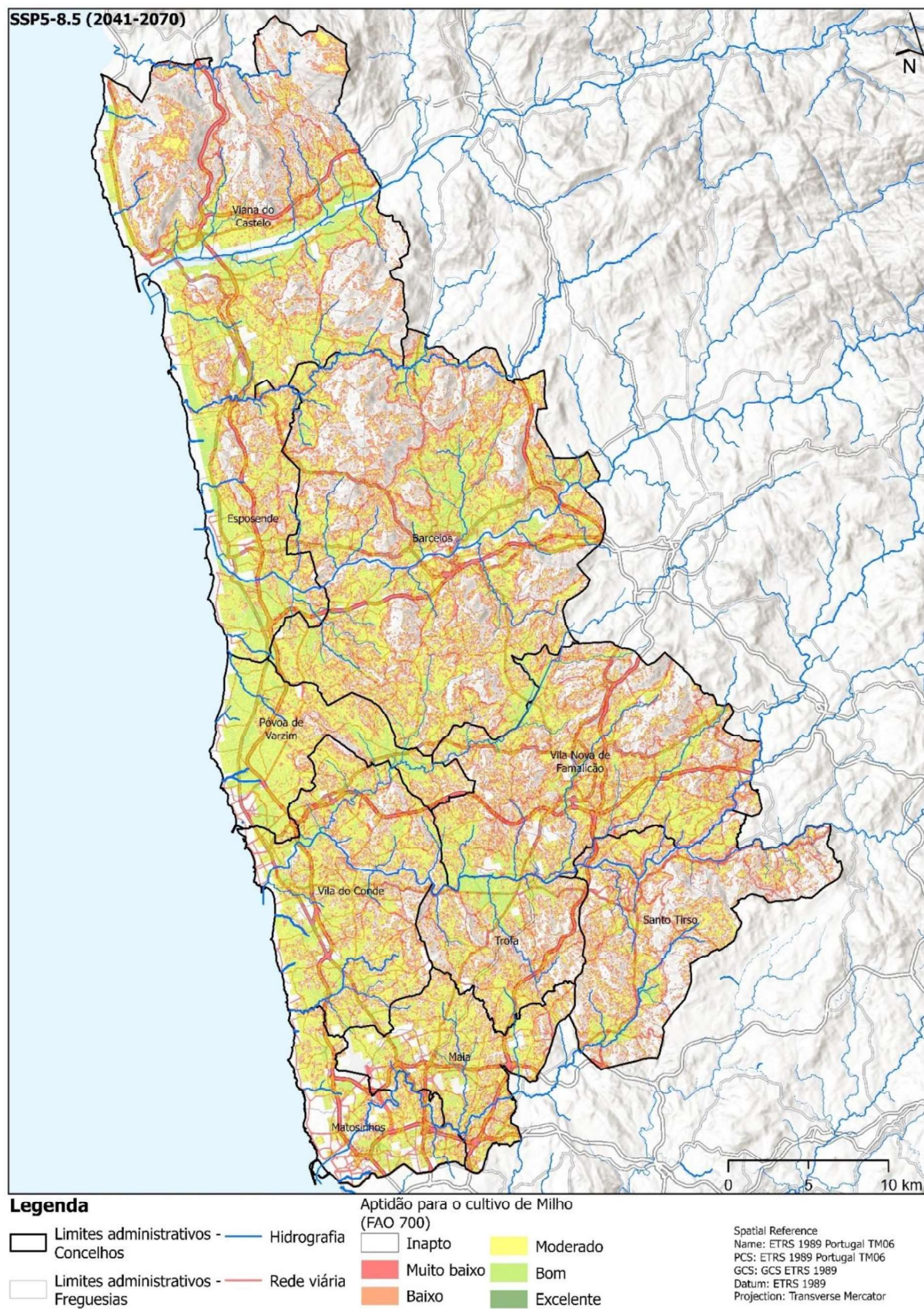


Figura A13.6. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 700 no cenário SSP5-8.5 para o período 2041–2070.

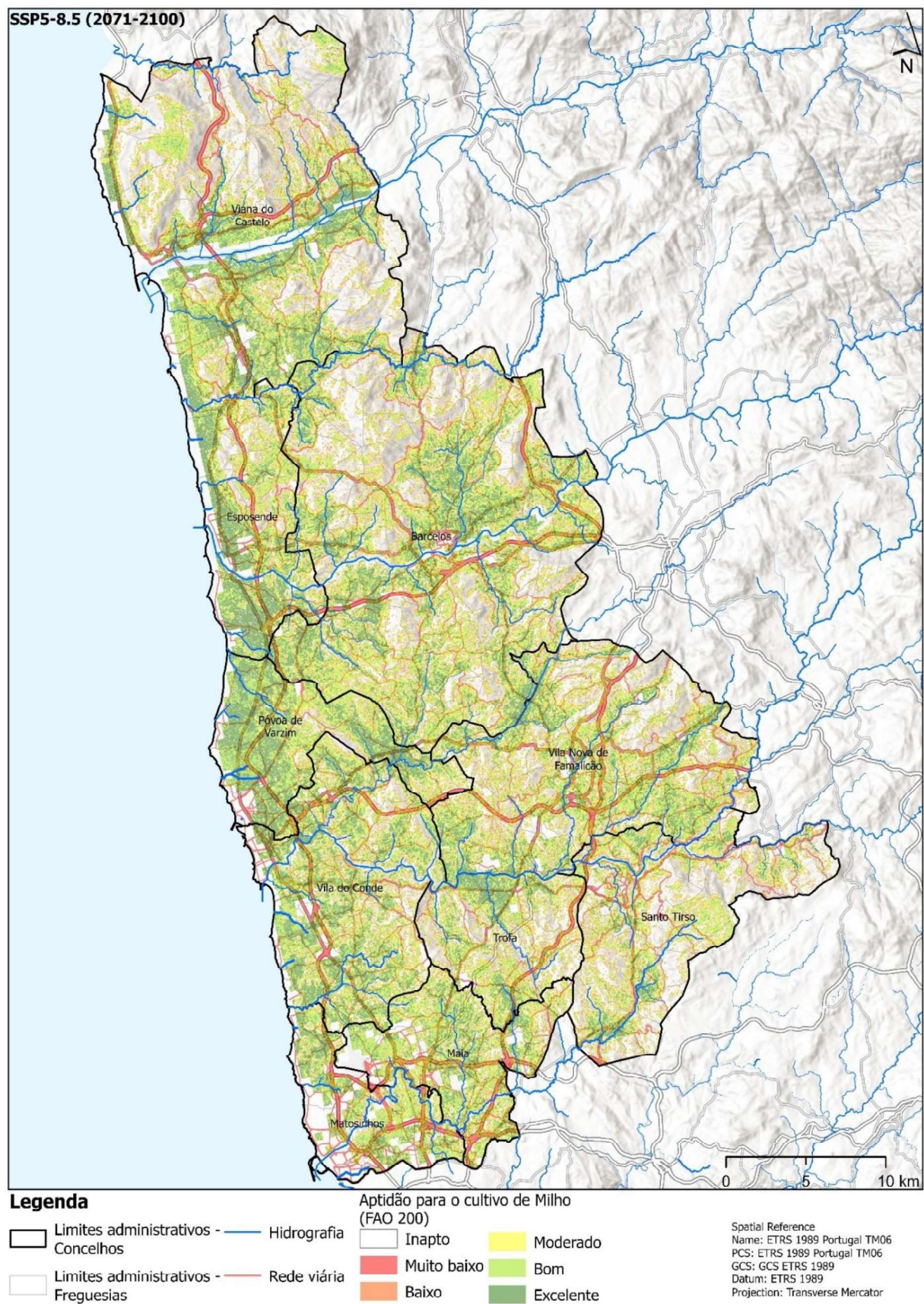


Figura A13.7. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 200 no cenário SSP5-8.5 para o período 2071–2100

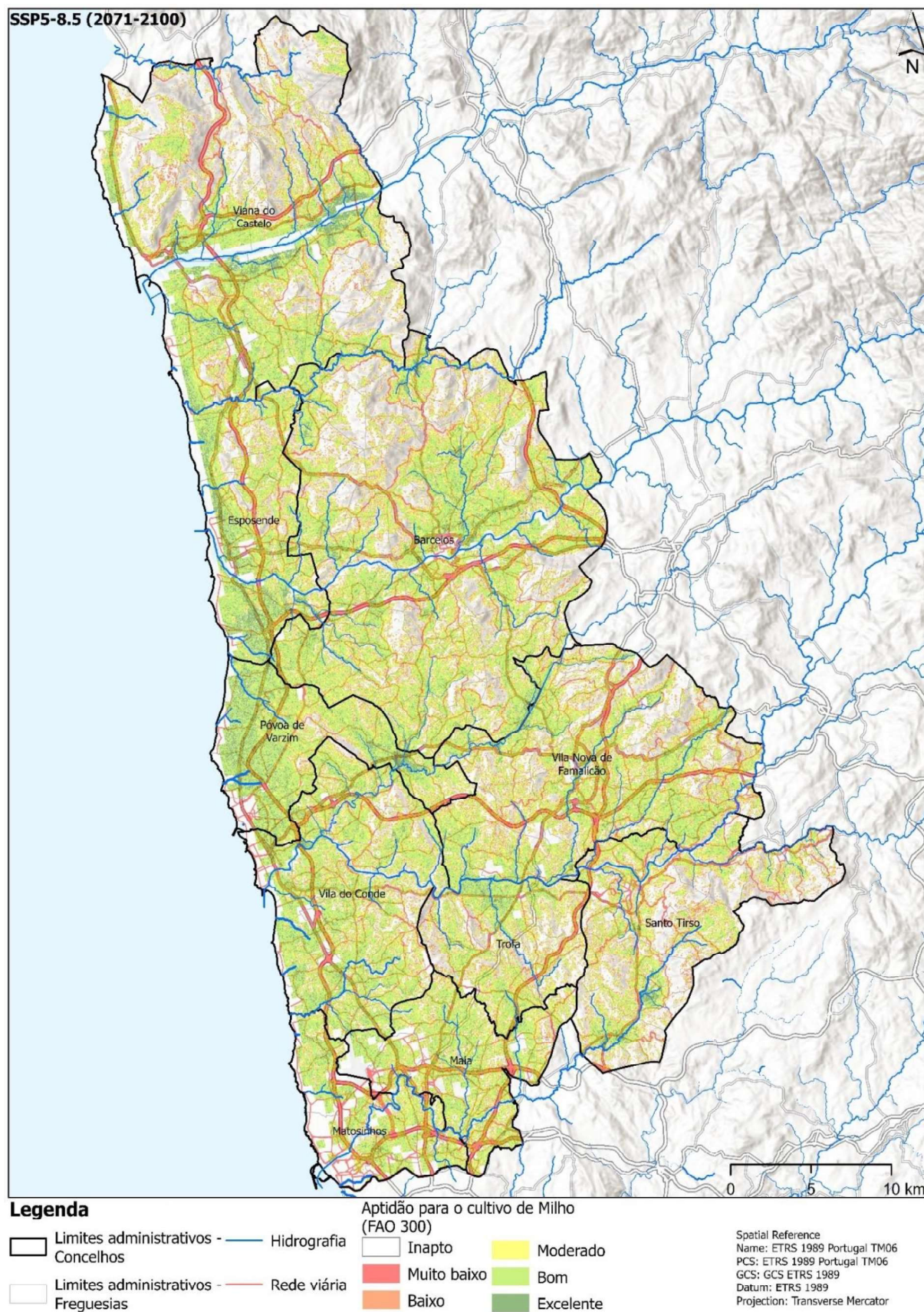


Figura A13.8. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 300 no cenário SSP5-8.5 para o período 2071–2100

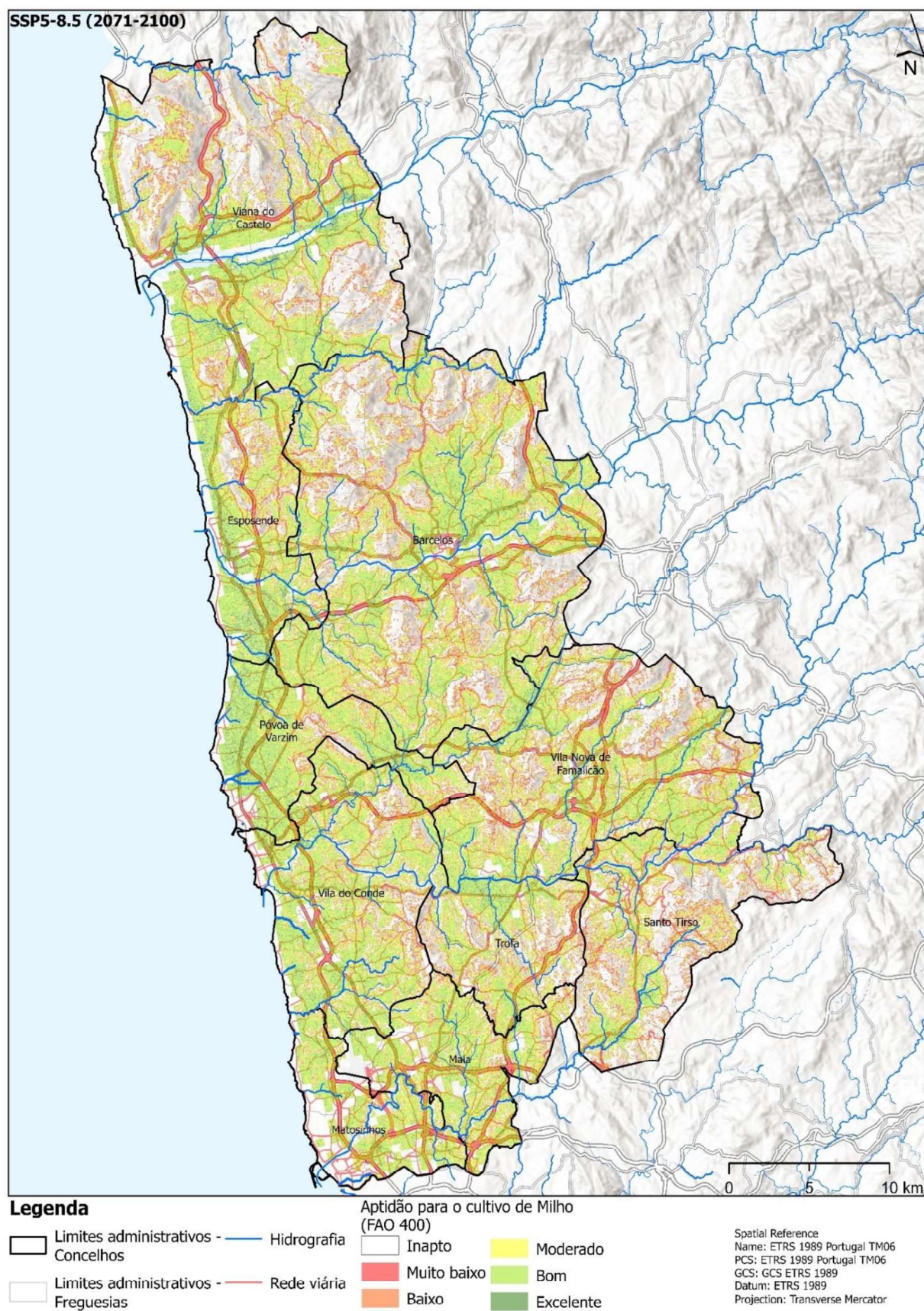


Figura A13.9. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 400 no cenário SSP5-8.5 para o período 2071–2100

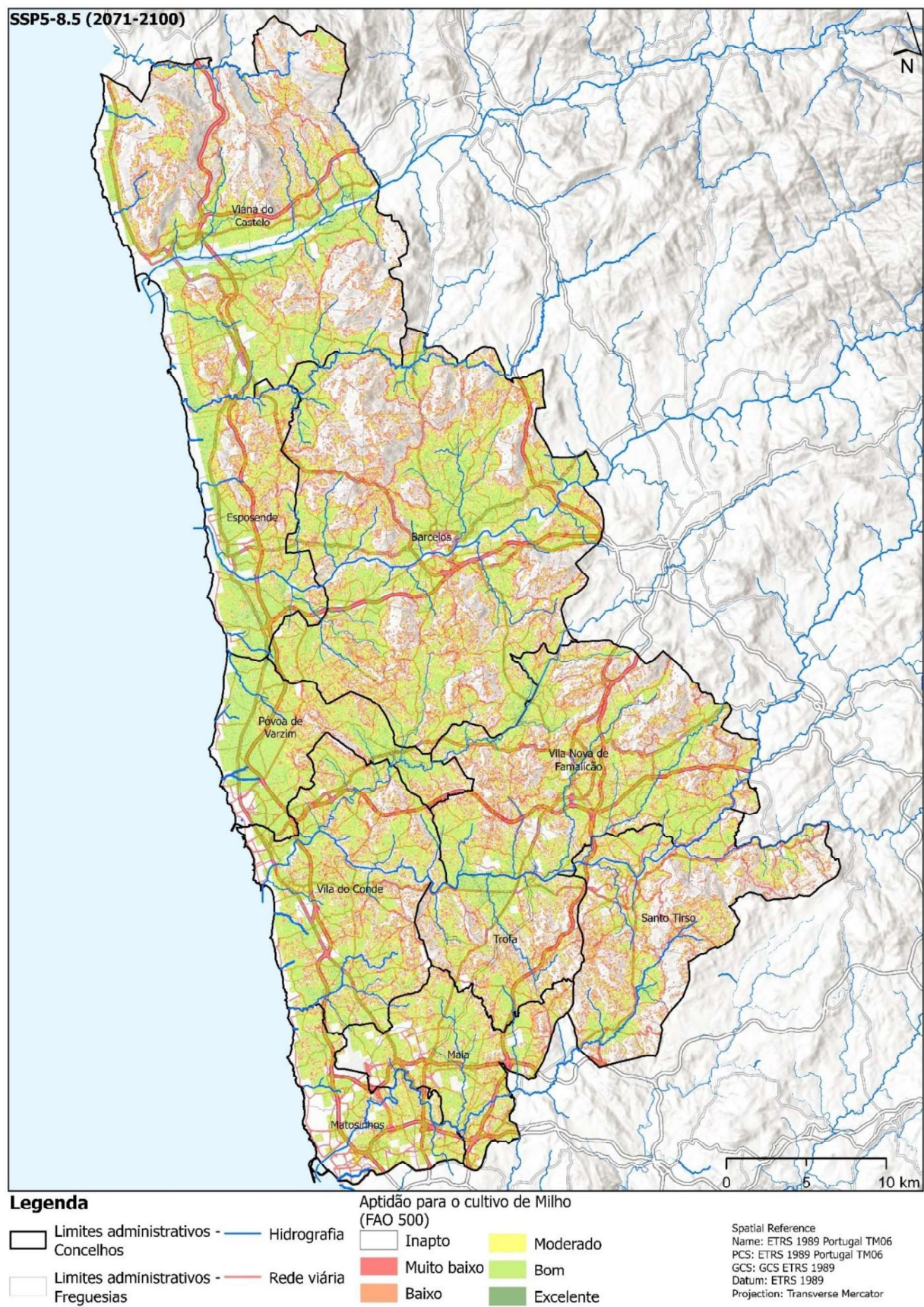


Figura A13.10. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 500 no cenário SSP5-8.5 para o período 2071–2100

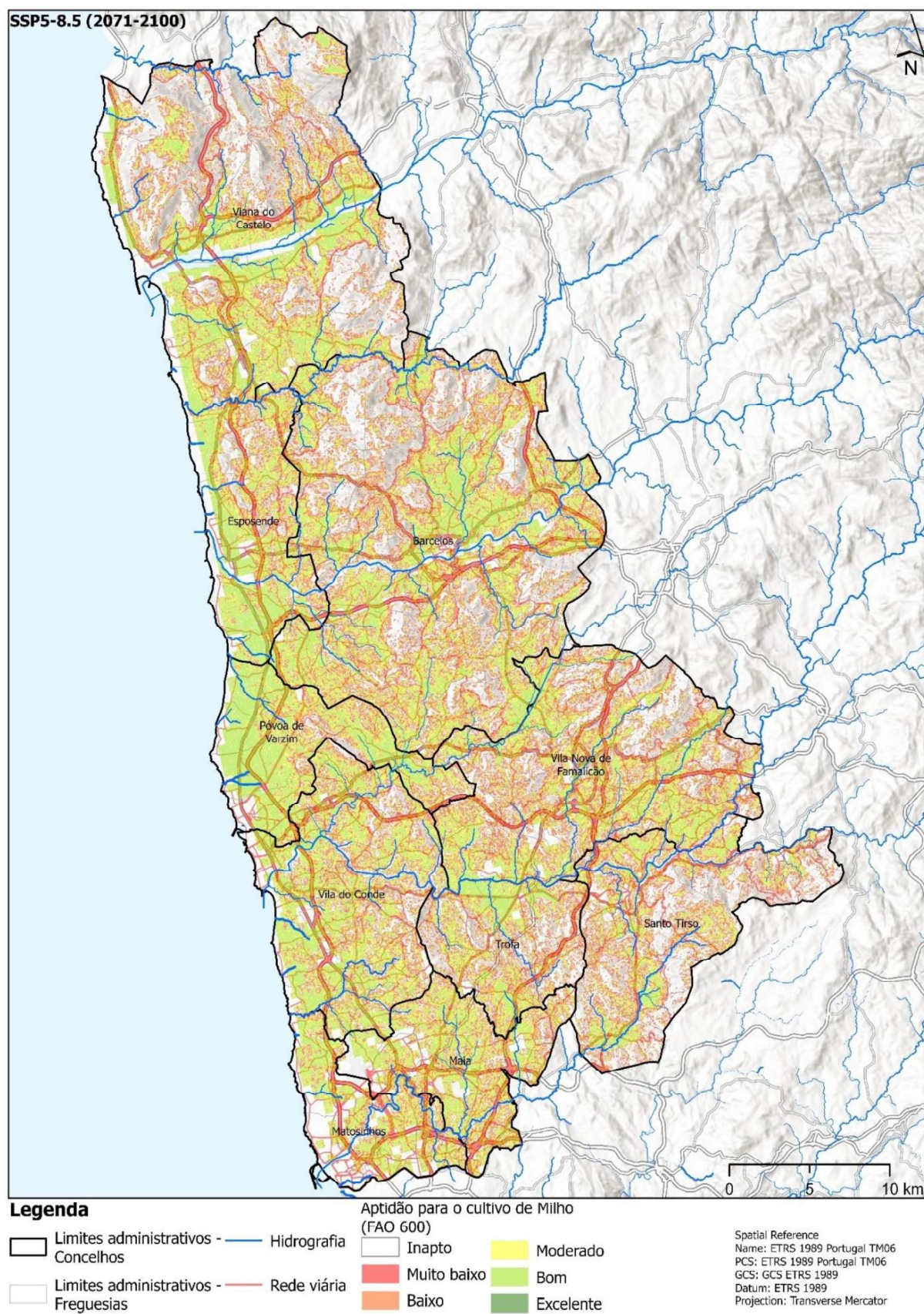


Figura A13.11. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 600 no cenário SSP5-8.5 para o período 2071–2100

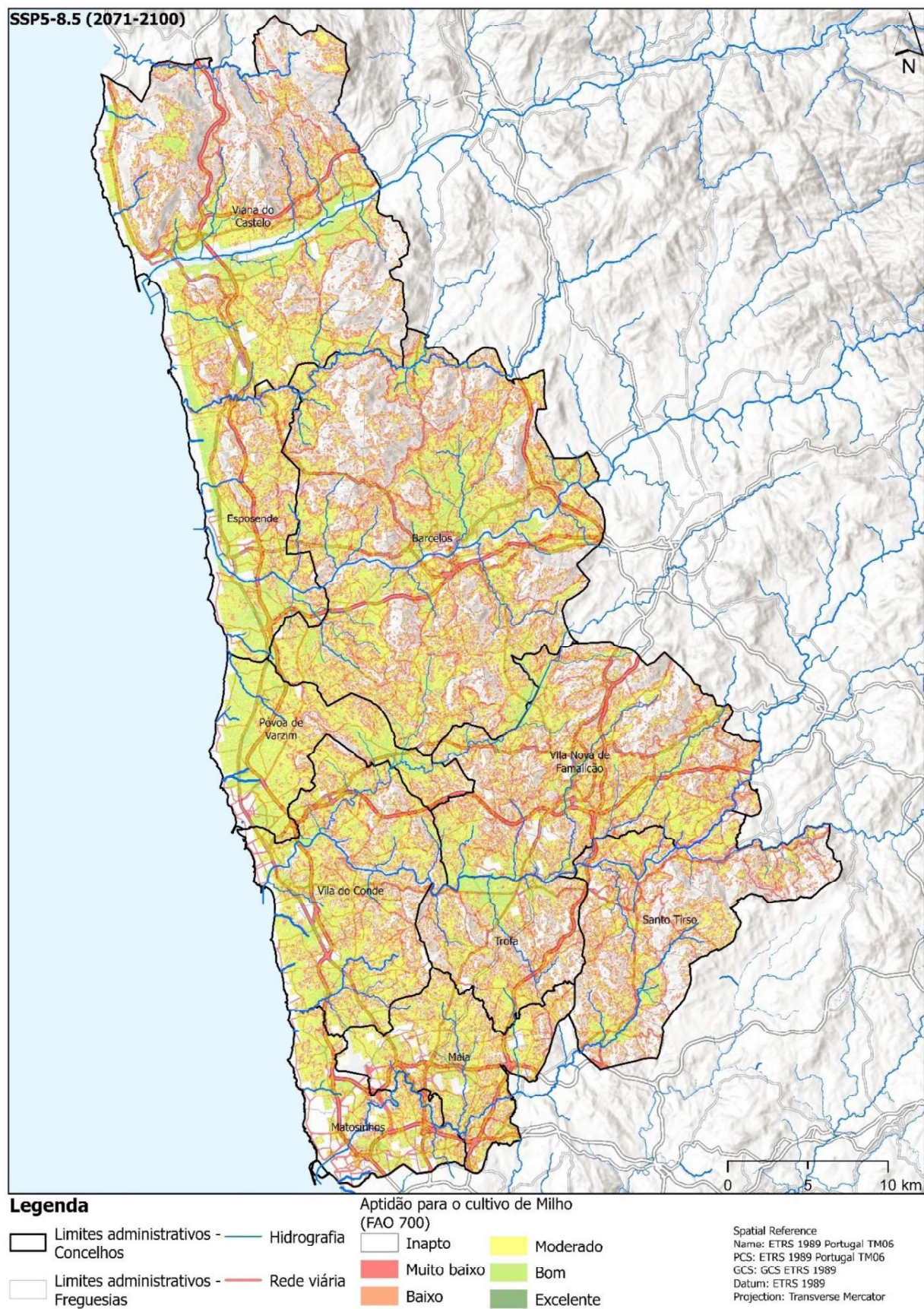


Figura A13.12. Aptidão agroecológica para o cultivo de milho correspondente ao grupo FAO 700 no cenário SSP5-8.5 para o período 2071–2100

